

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFETS ACOUSTIQUES ET ARTICULATOIRES DE PERTURBATIONS LABIALES
SUR LA PAROLE DES ENFANTS ET DES ADULTES

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN LINGUISTIQUE

PAR
JÉRÔME AUBIN

SEPTEMBRE 2006

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier Lucie, sans qui ce mémoire ne se serait probablement jamais réalisé. Merci pour m'avoir encouragé dans les nombreux moments de questionnements et d'incertitudes, et d'avoir contribué énormément à faire de moi le jeune chercheur en devenir que je suis présentement.

Je voudrais également remercier les lecteurs, qui ont cordialement accepté de lire cet ouvrage. J'espère que celui-ci sera à la hauteur de leurs attentes et que leur intérêt ne se verra pas dissipé par le style de présentation relativement illustré de ce mémoire ou encore par sa taille.

Aussi, je désire souligner la collaboration exemplaire et surtout la grande patience des sujets qui ont participé aux expériences. Merci à vous, qui êtes au cœur de cette recherche et qui m'avez permis de développer mes talents de marionnettiste.

Merci également à mon entourage de travail, à tous ceux qui ont fréquenté le Laboratoire de phonétique de l'UQAM de façon assidue lors de ces deux années. Je pense ici plus particulièrement à Sophie, Caroline, Annie L., Johanna, Aude, Anthony, Raoul, Annie B. et au reste de la joyeuse bande. Pour votre soutien, vos encouragements, vos rires et votre bonne humeur, merci.

Finalement, je tiens à remercier toute l'équipe de l'Institut de la Communication Parlée qui m'a accueilli lors de mon séjour à Grenoble, et plus spécialement Pascal Perrier, pour les discussions intéressantes et scientifiquement très motivantes.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xviii
RÉSUMÉ	xxiii
INTRODUCTION	1
Introduction.....	1
Objectifs.....	1
Contenu des chapitres	2
CHAPITRE I	
LA PERCEPTION DE LA PAROLE ET LES EXPÉRIENCES DE PERTURBATION.....	3
1.1 Quatre théories de la perception de la parole.....	3
1.2 Les expériences de perturbation de la parole	6
1.2.1 Les expériences avec une plaque occlusale.....	7
1.2.2 Les expériences avec un tube labial	16
1.3 Le rôle du feedback dans la production de la parole.....	19
1.4 Description des voyelles à l'étude	23
1.5 L'ultrasonographie comme technique d'imagerie de la surface de la langue	31
1.5.1 Possibilités et limites	33
1.6 Conclusion	37
CHAPITRE II	
SIMULATIONS À L'AIDE D'UN MODÈLE ARTICULATOIRE.....	38
2.1 Introduction.....	38
2.2 Simulation des perturbations.....	40
2.3 Évaluation des stratégies de compensation	46
2.4 Conclusion	50
CHAPITRE III	
ÉTUDE DES COMPENSATIONS ACOUSTIQUES ET ARTICULATOIRES.....	52
EN PAROLE PERTURBÉE.....	52
3.1 Méthodologie	52

3.1.1 Sujets	52
3.1.2 Stimuli	53
3.1.3 Instrumentation.....	54
3.1.4 Analyse des données acoustiques.....	56
3.1.5 Analyse des données articulatoires.....	59
3.2 Résultats.....	72
3.2.1 Résultats des données acoustiques	72
3.2.2 Résultats des données articulatoires	107
3.3 Corrélations articulatoire-acoustiques	130
3.4 Conclusion	135
CHAPITRE IV	
ÉTUDE PERCEPTIVE DES STRATÉGIES DE COMPENSATIONS	137
4.1 Méthodologie	137
4.1.1 Sujets	137
4.1.2 Stimuli	138
4.1.3 Instrumentation	138
4.1.4 Traitement des résultats.....	139
4.2 Résultats	140
4.2.1 Intelligibilité.....	140
4.2.2 Qualité et corrélats acoustiques	142
4.3 Conclusion	148
CHAPITRE V	
DISCUSSION.....	149
5.1 Détermination des stratégies compensatoires optimales.....	149
5.1.1 La voyelle [i]	149
5.1.2 La voyelle [y]	151
5.1.3 La voyelle [u]	154
5.3 Rôle de la fréquence fondamentale.....	157
5.4 La perception des voyelles.....	159
5.5 Le rôle du feedback.....	159

5.6 Le développement de l'articulation compensatoire	161
CONCLUSION.....	163
APPENDICE A	
ANALYSES STATISTIQUES	165
APPENDICE B	
DONNÉES ACOUSTIQUES	172
APPENDICE C	
PARAMÈTRES ARTICULATOIRES.....	191
APPENDICE D	
TRACÉS LINGUAUX	202

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Comparaison des valeurs de déplacement (en mm) pour la lèvre supérieure, la lèvre inférieure et la mâchoire pour 3 conditions et 4 groupes d'âge.....	10
1.2	Corrélations des trajectoires cinématiques de la mâchoire (j), de la lèvre inférieure (ll) et de la lèvre supérieure (ul) par rapport à la moyenne des trajectoires du groupe adulte.....	11
1.3	Configuration expérimentale utilisée par Riordan (1977) afin d'étudier la protrusion des lèvres et le déplacement du larynx.....	16
1.4	Schéma du modèle DIVA.....	20
1.5	Visualisation des espaces vocaliques des voyelles du français et emplacement des prototypes des voyelle [a], [i], [y] et [u].....	24
1.6	Position des voyelles orales des langues du monde pour un homme adulte dans les plans F1 vs. F2 et F2 vs. F3.....	26
1.7	Algorithme de calcul de F2'.....	27
1.8	Représentation du conduit vocal à l'aide d'un modèle 4 tubes.....	28
1.9	Coupe sagittale de la langue lors de la production de la voyelle [a].....	32
1.10	Surface de la langue détectée semi-automatiquement par le logiciel de détection de contours Edgetrak.....	33

1.11	Ombres créées par l'os hyoïde et la mâchoire.....	34
1.12	Systèmes de stabilisation ou de correction de position utilisés par différents laboratoires.....	35
1.13	Système de pointage laser, utilisé à l'ISRL.....	36
1.14	Technique main libre, utilisée au VTV Laboratory.....	36
1.15	Entrelacement des deux champs constituant l'image	37
2.1	Paramètres articulatoires du modèle VLAM et degrés de liberté associés.....	39
2.2	Représentations prototypiques d'un conduit vocal adulte lors de la production des voyelles [i], [y] et [u].....	42
2.3	Représentations prototypiques d'un conduit vocal de 6 ans lors de la production des voyelles [i], [y] et [u].....	42
2.4	Simulation des effets des perturbations labiales pour le locuteur adulte.	45
2.5	Simulation des effets des perturbations labiales pour un enfant de 6 ans	45
2.6	Configurations articulatoires de la voyelle [i] avant perturbation et après compensation, pour un conduit vocal adulte.....	47
2.7	Configurations articulatoires de la voyelle [y] avant perturbation et après compensation, pour un conduit vocal adulte.....	47
2.8	Configurations articulatoires de la voyelle [u] avant perturbation et après compensation, pour un conduit vocal adulte.....	47

2.9	Configurations articulatoires de la voyelle [i] avant perturbation et après compensation, pour un conduit vocal de 6 ans.....	48
2.10	Configurations articulatoires de la voyelle [y] avant perturbation et après compensation, pour un conduit vocal de 6 ans.....	48
2.11	Configurations articulatoires de la voyelle [u] avant perturbation et après compensation, pour un conduit vocal de 6 ans.....	48
3.1	Type de tube utilisé comme Perturbation labiale.....	55
3.2	Éléments analysés sur le signal acoustique de chaque voyelle.....	57
3.3	Début de voyelle apériodique.....	57
3.4	Premier passage par zéro de la première vibration périodique.....	58
3.5	Quelques problèmes liés à l’affichage des images d’ultrasonographie...	60
3.6	Caractérisation de la langue à l’aide de son point le plus élevé et mise en évidence des ressemblances sur le plan acoustique.....	61
3.7	Direction de la sonde par rapport au plan occlusal. Noter que la direction de la sonde n’est pas perpendiculaire au plancher de la bouche.....	62
3.8	Résultat de l’Analyse par composantes principales de Lindblom et Sussman (2002).....	63
3.9	Formation du triangle faite par Lingua à l’aide des points A, B et C.....	65
3.10	Types de triangles obtenus pour les voyelles[a], [i] et [u], à partir de contours réels.....	65

3.11	Détermination de la courbure (AB/CD), et de la position de cette courbure (AD/DB).....	66
3.12	Représentation de la position et de la forme de la langue pour le locuteur AL_a.....	67
3.13	Représentation de la position et de la forme de la langue pour le locuteur AC_a.....	68
3.14	Contours de la langue lors de la production des voyelles /a/ et /y/.....	69
3.15	Contours de la langue lors de la production des voyelles /a/ (après rotation) et /y/.....	69
3.16	Plan d'imagerie relatif à la sonde, délimité par les lignes extérieures...	70
3.17	Effets des muscles extrinsèques de la langue montrant une relation orthogonale parmi les muscles antagonistes.....	71
3.18	Pourcentage de changement de la fréquence fondamentale moyenne des conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes et enfants.....	75
3.19	Pourcentage de changement du premier formant lorsdes conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes et enfants.....	76
3.20	Pourcentage de changement du deuxième formant lorsdes conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes et enfants.....	76

3.21	Pourcentage de changement du troisième formant lorsdes conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes et enfants.....	77
3.22	Pourcentage de changement du quatrième formant lorsdes conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes et enfants.....	77
3.23	Pourcentage de changement des aires des ellipses sur le plan F1 vs F2 lors des différentes conditions de production, pour les adultes et les enfants.....	78
3.24	Pourcentage de changement des aires des ellipses sur le plan F2 vs F3 lors des différentes conditions de production, pour les adultes et les enfants.....	79
3.25	Différents cas possibles de positionnement d'ellipses.....	80
3.26	Patrons d'évolution des trajectoires des différences des formants convergents.....	81
3.27	Résultats acoustiques pour la voyelle [i] du locuteur AC_a.....	82
3.28	Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice AL_a	83
3.29	Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice JR_a	84
3.30	Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice MB_a.....	85
3.31	Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice BP_e.....	86
3.32	Résultats acoustiques pour la voyelle [i] du locuteur JC_e.....	87

3.33	Résultats acoustiques pour la voyelle [i] du locuteur LB_e.....	88
3.34	Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice MC_e.....	89
3.35	Résultats acoustiques pour la voyelle [y] du locuteur AC_a.....	90
3.36	Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice AL_a	91
3.37	Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice JR_a	92
3.38	Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice MB_a.....	93
3.39	Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice BP_e.....	94
3.40	Résultats acoustiques pour la voyelle [y] du locuteur JC_e.....	95
3.41	Résultats acoustiques pour la voyelle [y] du locuteur LB_e.....	96
3.42	Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice MC_e.....	97
3.43	Résultats acoustiques pour la voyelle [u] du locuteur AC_a.....	98
3.44	Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice AL_a	99
3.45	Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice JR_a	100
3.46	Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice MB_a.....	101
3.47	Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice BP_e.....	102
3.48	Résultats acoustiques pour la voyelle [u] du locuteur JC_e.....	103
3.49	Résultats acoustiques pour la voyelle [u] du locuteur LB_e.....	104

3.50	Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice MC_e.....	105
3.51	Espace articulatoire du locuteur AC_e, en condition normale préperturbation et normale postperturbation.....	109
3.52	Espace articulatoire de la locutrice AL_a, en condition normale préperturbation et normale postperturbation.....	110
3.53	Espace articulatoire de la locutrice JR_a, en condition normale préperturbation et normale postperturbation.....	111
3.54	Espace articulatoire de la locutrice MB_a, en condition normale préperturbation et normale postperturbation.....	112
3.55	Espace articulatoire de la locutrice BP_e, en condition normale préperturbation et normale postperturbation.....	113
3.56	Espace articulatoire du locuteur JC_e, en condition normale préperturbation et normale postperturbation.....	114
3.57	Espace articulatoire du locuteur LB_e, en condition normale préperturbation et normale postperturbation.....	115
3.58	Espace articulatoire de la locutrice MC_e, en condition normale préperturbation et normale postperturbation.....	116
3.59	Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur AC_a.....	117
3.60	Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locutrice AL_a.....	117
3.61	Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locutrice JR_a.....	118
3.62	Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locutrice MB_a.....	118
3.63	Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locutrice BP_e.....	119

3.64	Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur JC_e.....	119
3.65	Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur LB_e.....	120
3.66	Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locutrice MC_e	120
3.67	Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locuteur AC_a.....	121
3.68	Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice AL_a.....	121
3.69	Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice JR_a...	122
3.70	Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice MB_a....	122
3.71	Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice BP_e.....	123
3.72	Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locuteur JC_e.....	123
3.73	Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locuteur LB_e...	124
3.74	Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice MC_e ...	124
3.75	Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locuteur AC_a.....	125
3.76	Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice AL_a.....	125
3.77	Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice JR_a...	126
3.78	Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice MB_a....	126
3.79	Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice BP_e.....	127
3.80	Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locuteur JC_e.....	127

3.81	Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locuteur LB_e...	128
3.82	Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice MC_e ...	128
3.83	Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locuteur AC_a).....	131
3.84	Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice AL_a).....	131
3.85	Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice JR_a).....	132
3.86	Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice MB_a).....	132
3.87	Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice BP_e).....	133
3.88	Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locuteur JC_e).....	133
3.89	Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locuteur LB_e).....	134
3.90	Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice MC_a).....	134
4.1	Interface du test de perception.....	139

4.2	Erreurs d'identification les plus communes.....	142
4.3	Répartition des voyelles produites [u] selon la qualité perçue, à l'aide du critère acoustique F1.....	145
4.4	Répartition des voyelles produites [y] selon la qualité perçue, à l'aide des critères acoustiques F2 et F2-F0.....	145
4.5	Répartition des voyelles produites [y] par chaque locuteur selon la qualité perçue, à l'aide du critère F2.....	146
4.6	Dispersion des voyelles produites [i] selon la qualité perçue sur le plan F2 vs F2-F1.....	146
4.7	Répartition des voyelles produites [i] selon la qualité perçue à l'aide du critère F2-F1, voyelles du locuteur AC_a retirées.....	147
4.8	Dispersion des voyelles sur le plan F2 vs. F2-F1 selon la qualité perçue. Les voyelles du locuteur AC_a ont été retirées.....	147
5.1	Contours typiques de la locutrice AL_a.....	152
5.1	Contours de la locutrice MC_e pour la voyelle [y], condition normale et perturbée.....	153
5.3	Effets postperturbations observés.....	160
5.4	Quelques exemples d'effets postperturbations.....	160
D.1	Tracés linguaux des voyelles [i], [y] et [u] pour les conditions n1, p et n2 (Locuteur AC_a).....	216
D.2	Tracés linguaux des voyelles [i], [y] et [u] pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice AL_a).....	217

D.3	Tracés linguaux des voyelles [i], [y] et [u] pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice JR_a).....	218
D.4	Tracés linguaux des voyelles [i], [y] et [u] pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice MB_a).....	219
D.5	Tracés linguaux des voyelles [i], [y] et [u] pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice BP_e).....	220
D.6	Tracés linguaux des voyelles [i], [y] et [u] pour les conditions n1, p et n2 (Locuteur JC_e).....	221
D.7	Tracés linguaux des voyelles [i], [y] et [u] pour les conditions n1, p et n2 (Locuteur LB_e).....	222
D.8	Tracés linguaux des voyelles [i], [y] et [u] pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice MC_a).....	223

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.1	Résumé des résultats des expériences à l'aide d'une plaque occlusale (sujets adultes).....	13
1.2	Résumé des résultats des expériences à l'aide d'une plaque occlusale (sujets enfants).....	14
1.3	Affiliations formants-cavités pour l'homme adulte du modèle VLAM..	29
2.1	Prototypes utilisés pour les simulations sur un conduit vocal adulte.....	41
2.2	Prototypes utilisés pour les simulations sur un conduit vocal de 6 ans...	41
2.3	Variations d'aires aux lèvres pour un conduit vocal de 21 ans.....	43
2.4	Variations d'aires aux lèvres pour un conduit vocal de 6 ans.....	43
2.5	Valeurs formantiques des prototypes vocaliques avant et après les simulations de perturbations (conduit vocal d'adulte).....	44
2.6	Valeurs formantiques des prototypes vocaliques avant et après les simulations de perturbations (conduit vocal d'un enfant de 6 ans).....	44
2.7	Valeurs acoustiques une fois les compensations effectuées, et variation de ces valeurs par rapport aux valeurs prototypiques initiales (conduit vocal adulte).....	49

2.8	Valeurs acoustiques une fois les compensations effectuées, et variation de ces valeurs par rapport aux valeurs prototypiques initiales (conduit vocal de 6 ans).....	49
3.1	Tubes utilisés en fonction des voyelles et des locuteurs.....	55
3.2	Résultat des tests de Student pairés montrant les différences, pour la fréquence fondamentale et les quatre premiers formants, entre les valeurs prises au début des voyelles et celles prises au milieu.....	73
3.3	Effet du facteur âge et des facteurs condition et âge sur les valeurs acoustiques.....	74
3.4	Différences significatives observées en condition perturbée par rapport aux valeurs de la condition normale préperturbation pour la voyelle [i]	106
3.5	Différences significatives observées en condition perturbée par rapport aux valeurs de la condition normale préperturbation pour la voyelle [y]	106
3.6	Différences significatives observées en condition perturbée par rapport aux valeurs de la condition normale préperturbation pour la voyelle [y]	107
3.7	Effet de la condition de production (p vs n1) sur les paramètres articulatoires pour la voyelle [i].....	129
3.8	Effet de la condition de production (p vs n1) sur les paramètres articulatoires pour la voyelle [y].....	129
3.9	Effet de la condition de production (p vs n1) sur les paramètres articulatoires pour la voyelle [u].....	129
3.10	Corrélations significatives des paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure avec le paramètre acoustique F2, résultant des régressions linéaires effectuées.....	135
4.1	Nombre de voyelles correctement identifiées pour chacun des locuteurs.....	141

4.2	Qualité de la meilleure répétition en condition perturbée et qualité moyenne de la condition normale préperturbation	142
4.3	Qualité moyenne des répétitions en conditions normale préperturbation et normale postperturbation.....	143
5.1	Effets de la condition perturbée par rapport à la condition normale sur les paramètres articulatoires et acoustiques.....	150
A.1	Résultat des tests de Student pairés pour l'effet de l'instant de mesure sur la condition perturbée (sujets adultes)	165
A.2	Résultat des tests de Student pairés pour l'effet de l'instant de mesure sur la condition perturbée (sujets enfants).....	166
A.3	Effet de la condition sur la fréquence fondamentale et les quatre premiers formants (sujets adultes).....	166
A.4	Effet de la condition sur la fréquence fondamentale et les quatre premiers formants (sujets enfants).....	167
A.5	Effet de la condition sur l'aire des ellipses sur les plans F1/F2 et F2/F3 (sujets adultes)	167
A.6	Effet de la condition sur l'aire des ellipses sur les plans F1/F2 et F2/F3 (sujets enfants).....	167
A.7	Résultats des tests de Student concernant l'effet de la condition (p vs n1) sur les paramètres acoustiques, pour chaque locuteur, pour la voyelle [i].....	168
A.8	Résultats des tests de Student concernant l'effet de la condition (p vs n1) sur les paramètres acoustiques, pour chaque locuteur, pour la voyelle [y].....	168

A.9	Résultats des tests de student concernant l'effet de la condition (p vs n1) sur les paramètres acoustiques, pour chaque locuteur, pour la voyelle [u].....	169
A.10	Différences significatives (selon les tests de Student) entre les diverses conditions, pour les paramètres articulatoires de chaque locuteur, pour chaque voyelle.....	169
A.11	Résultats des tests de Student reflétant les différences de la qualité moyenne des répétitions en condition normale préperturbation par rapport à la condition normale postperturbation pour chaque voyelle de chaque locuteur.....	171
B.1	Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locuteur AC_a)...	172
B.2	Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice AL_a)...	174
B.3	Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice JR_a)...	177
B.4	Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice MB_a)..	179
B.5	Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice BP_e)...	181
B.6	Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locuteur JC_e)...	184
B.7	Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locuteur LB_e)...	186
B.8	Valeurs acoustiques prises au milieu des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice MC_e).....	188

C.1	Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour le locuteur AC_a.....	191
C.2	Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice AL_a.....	192
C.3	Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice JR_a.....	194
C.4	Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice MB_a.....	195
C.5	Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice BP_e.....	196
C.6	Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour le locuteur JC_e.....	198
C.7	Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour le locuteur LB_e.....	199
C.8	Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice MC_e.....	200

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur les compensations articulatoires occasionnées par une perturbation artificielle de la parole. Un tube inséré entre les lèvres de quatre locuteurs enfants et quatre adultes a servi de perturbation labiale lors de la production des voyelles [i], [y] et [u] du français québécois. Des données acoustiques et articulatoires (imagerie par ultrasonographie) ont été récoltées lors de la production de ces voyelles dans trois conditions : normale préperturbation, perturbée, et normale postperturbation. L'efficacité des compensations articulatoires effectuées a été évaluée sur la base de critères perceptifs. Les stratégies de compensation les plus efficaces ont été comparées à celles issues de simulations sur le modèle articulatoire *VLAM* à l'aide d'une nouvelle méthode d'analyse des tracés linguaux. Les résultats indiquent que les enfants ont été aussi compétents que les adultes puisque tous les sujets ont été capables de produire des voyelles en condition perturbée de qualité égale ou supérieure à celles en condition préperturbation pour au moins une des trois perturbations. Cependant, aucun locuteur n'a été capable de faire de compensation totale pour toutes les perturbations, indiquant que l'articulation compensatoire semble être de nature sélective, gouvernée par des contraintes articulatoires propres à chaque locuteur. Également, une compensation efficace des paramètres acoustiques F1, F2 et F3 ne semble pas être nécessaire pour effectuer une bonne compensation sur le plan perceptif. Les observations entre les données perceptives et les données acoustiques de production suggèrent que la fréquence fondamentale joue un rôle dans la qualité des voyelles. Le paramètre acoustique F1 est celui décrivant le mieux la cible perceptive pour [u], tandis que la valeur de F2 semble faire partie des critères déterminant la qualité optimale pour les voyelles [i] et [y]. L'articulation compensatoire paraît être un phénomène se développant en synchronie avec les productions langagières de l'enfant. L'étude de ce phénomène vient préciser d'avantage l'objectif du locuteur dans le processus de production de la parole. En regard aux données de production de la présente étude, la tâche du locuteur semble être à la fois de nature articulatoire et acoustique, tout en étant guidée prioritairement par des critères acoustico-perceptifs.

Mots clés : parole, perturbation, articulation, ultrasons, enfants

INTRODUCTION

Introduction

Lors de l'apprentissage de sa langue maternelle, l'enfant établit son modèle interne de production de la parole. Pendant l'élaboration de ce modèle, il met en relation les configurations articulatoires qu'il adopte aux sons qu'il produit. Les informations somatosensorielles, auditives et proprioceptives récupérées par l'enfant aident ce dernier à optimiser son modèle afin de renforcer les relations articulatoire-acoustiques qui y sont présentes. Les études sur des sujets dont l'élaboration du modèle interne de production de la parole n'est pas encore terminée permettent de préciser le rôle des différentes composantes qui entrent en jeu dans le processus de production de la parole et sont primordiales à la compréhension de l'aspect développemental de ce processus.

Un paradigme de recherche s'est développé au cours des années dans le but d'étudier les différents modules qui composent le modèle interne de production de la parole. Il s'agit des expériences de perturbation, qui étudient le phénomène d'articulation compensatoire. Ce dernier est une manifestation de la capacité d'équivalence motrice de l'humain, celle-ci permettant à l'homme d'atteindre une même cible spatiale avec une variété de trajectoires différentes, en faisant appel à différents groupes musculaires. C'est dans ce cadre d'articulation compensatoire que ce mémoire s'inscrit.

Objectifs

Les objectifs de cette recherche sont multiples, l'objectif principal étant d'étudier les effets acoustiques et articulatoires de perturbations labiales sur la production de la parole chez les enfants. Cela permettra de quantifier l'efficacité des stratégies adoptées par les locuteurs et de préciser le rôle du feedback auditif dans le processus de production de la parole. L'atteinte de

cet objectif nécessite l'utilisation d'un appareil à ultrasons, une technologie de pointe qui permet d'imager la langue et dont l'utilisation est encore peu répandue sur des sujets enfants.

Le second objectif, nécessaire à la réalisation du premier, est d'élaborer une méthode d'analyse quantitative efficace des données fournies par l'ultrasonographie afin de décrire de manière optimale les configurations articulatoires de la langue. Il sera alors possible de mettre en relation les stratégies articulatoires élaborées avec les produits acoustiques résultant de celles-ci.

Finalement, une analyse perceptive des données permettra de déterminer la pertinence des stratégies de compensation produites par les locuteurs. Ce critère perceptif, relié aux données acoustiques, pourra ensuite préciser les meilleurs corrélats acoustiques caractérisant l'invariance des voyelles hautes du français. Ces deux volets, production et perception, apporteront davantage de données et d'éclaircissements en ce qui a trait au phénomène d'équivalence motrice dans le processus de production de la parole chez les enfants.

Contenu des chapitres

Le premier chapitre abordera les grandes théories de la perception de la parole pour ensuite faire une revue des études antérieures pertinentes au phénomène étudié. Le rôle des différents types de feedback sera présenté et les voyelles à l'étude seront décrites. Le chapitre se termine par la présentation des caractéristiques propres à l'utilisation de l'ultrasonographie en phonétique. Le chapitre suivant présente les résultats de simulations effectuées avec le modèle articulatoire *VLAM* afin de valider le choix des perturbations utilisées et d'avoir un aperçu des effets acoustiques induits par ces perturbations. Ces simulations pourront également identifier les meilleures configurations articulatoires à adopter pour faire une compensation optimale. La partie production de l'étude est traitée au chapitre trois, tandis que le volet perception fait l'objet du chapitre quatre. Les comparaisons des stratégies articulatoires aux stratégies acoustiques feront l'objet de la discussion. Les données de perception y seront également mises en relation avec les données de production et une typologie des stratégies de compensation élaborées par les locuteurs sera proposée.

CHAPITRE I

LA PERCEPTION DE LA PAROLE ET LES EXPÉRIENCES DE PERTURBATION

Les expériences perturbant la parole aident à préciser le rôle des différents types de feedback dans le processus de production de la parole, contribuant ainsi à mieux définir l'objectif de ce même processus. Cependant, les théories ne s'accordent pas toutes quant à la nature de l'objet qui est perçu lors de la production de la parole. Avant de résumer les résultats des expériences utilisant différentes perturbations, il est donc nécessaire de faire un survol des théories contemporaines de la perception de la parole. Il sera alors possible, ensuite, de se pencher sur ce que ces expériences peuvent apporter à ces théories et de présenter un modèle du contrôle moteur de la parole capable de rendre compte de ces données.

1.1 Quatre théories de la perception de la parole

La recherche d'invariance dans la parole a été et est encore un débat des plus importants. De ce débat, plusieurs théories ont émergé, s'opposant ainsi sur la nature et la présence même de corrélats physiques perceptivement décodables dans la parole. Pour certaines de ces théories (*Acoustic Invariance Theory*, *Adaptive Variability Theory*), la nature de l'objet perçu serait de type acoustique, tandis que pour d'autres (*Motor Theory*, *Direct-Realist Theory*), elle serait plutôt articulatoire.

La théorie de l'invariance acoustique (*Acoustic Invariance Theory*), proposée par Blumstein (1986) et Stevens et Blumstein (1980) repose sur deux hypothèses, la première étant que le signal acoustique lui-même posséderait des caractéristiques acoustiques invariantes dans sa structure. La deuxième hypothèse est que le système perceptif serait sensible à ces propriétés

invariantes et qu'il les utiliserait dans le processus de traitement de la parole. Cette invariance acoustique reposerait sur les caractéristiques phonétiques des langues naturelles et serait indépendante du locuteur :

«That is, it is hypothesized that the speech signal is highly structured in that it contains invariant acoustic patterns for phonetic features, and these patterns remain invariant across speakers, phonetic contexts, language...» (Blumstein, 1986, p.178).

La deuxième théorie défendant la primauté des caractéristiques acoustiques sur les caractéristiques articulatoires est la théorie de variabilité adaptative (*Adaptive Variability Theory*) de Lindblom (1988; 1996). Voici les 5 hypothèses de cette théorie appuyant l'idée que la parole serait plutôt perçue à l'aide de certaines caractéristiques acoustiques :

- L'auditeur et la situation de communication contribuent significativement à définir la tâche du locuteur;
- Cette tâche comporte des variations à court et à long terme;
- Le locuteur s'adapte à cette tâche;
- Cette adaptation ne se fait pas dans le but de faciliter le recouvrement articulatoire mais plutôt afin de produire un signal auditif devant toujours posséder suffisamment d'informations discriminantes;
- Dans le cas idéal, le degré de coarticulation du locuteur ne dépassera pas le seuil critique de tolérance de l'auditeur.

Cependant, Lindblom rejette l'idée de l'existence d'un invariant, puisque selon lui il ne s'agit pas d'un problème d'ordre phonétique. L'invariance des catégories linguistiques résiderait seulement sur le plan de la compréhension du locuteur. Ce serait donc ce comportement adaptatif du locuteur qui serait la cause du manque d'invariance dans le signal de la parole. Malgré cela, il y aurait tout de même une quantité suffisante d'informations discriminantes dans le signal acoustique, permettant ainsi à un auditeur de décoder ce dernier.

«Taking that scenario seriously, we are forced to conclude that speech production is organized neither in terms of articulatory/gestural nor acoustic/auditory goals. It further follows from the proposed perspective that neither articulation nor any other level should be seen as privileged. Admittedly though it is ultimately the auditory form of the utterance that must meet the condition of sufficient discriminability» (Lindblom, 1996, p. 1690).

Selon la *Motor Theory* (Liberman et Mattingly, 1985) et la *Direct Realist Theory* (Fowler 1991; 1996), l'objet de la perception de la parole serait de type articulatoire. Le principal élément sur lequel ces théories diffèrent est que la première traite la perception de la parole comme étant un système spécial de perception, tandis que la seconde la considère à l'intérieur du système perceptif global. Pour Liberman et Mattingly, l'objet invariant de la perception de la parole se trouverait dans les commandes motrices contrôlant les mouvements des articulateurs. La parole serait donc décodée en retrouvant les gestes articulatoires produits par le locuteur à l'aide du système de contrôle moteur du locuteur :

«...objects of speech perception are the intended phonetic gestures of the speaker, represented in the brain as invariant motor commands that call for movements of the articulators through certain linguistically significant configuration.» (Liberman et Mattingly, 1985, p.2).

Ce type de perception s'oppose à celui proposé par la *Direct Realist Theory*, qui considère le système perceptif de la parole comme n'importe quel autre système perceptif :

«...speech perception is not special, and there is no more reason to propose a role for the speech motor system in speech perception than to propose an analogous role for the viewer's locomotor system in visual perception of walking» (Fowler, 1996, p.1731).

Fowler croit également que cette perception est directe, et que les objets perceptifs sont les configurations articulatoires du conduit vocal. Seulement, cette perception ne requiert pas d'association entre les configurations du conduit vocal et un quelconque système de contrôle moteur de la parole.

«It was never necessary to propose that the perception of gestures requires recruitment of the listener's own speech motor system» (Fowler, 1996, p.1740).

Cela constitue une autre différence importante entre la théorie de Liberman et Mattingly et celle de Fowler, puisque l'une suggère que l'objet perçu est le geste intentionné, et l'autre le geste réellement produit par le locuteur.

Ces quatre théories diffèrent sur plusieurs points majeurs et discutables. Certains résultats expérimentaux apportent des appuis directs ou constituent des arguments en défaveur des hypothèses postulées ou des points soulevés dans ces théories. C'est le cas des expériences étudiant le phénomène d'équivalence motrice dans la parole. En regard de ces théories, ces expériences sont particulièrement pertinentes puisque le fait de perturber la parole force le locuteur à réaliser la tâche du processus de production de la parole, et par conséquent à préciser la nature de l'objet perçu. Le phénomène d'articulation compensatoire est donc en lien direct avec les théories de perception de la parole. De plus, les différents types de perturbations utilisées dans ces expériences font en sorte que les résultats peuvent nous donner différentes interprétations sur le rôle du feedback dans la production de la parole. En apportant davantage de précisions sur les propriétés de l'objet de la perception de la parole et en caractérisant les rôles des différents types de feedback, les études perturbant la parole constituent des éléments importants dans la compréhension du contrôle moteur de la parole.

1.2 Les expériences de perturbation de la parole

Bien que plusieurs de ces expériences aient été faites avec des sujets adultes, ce sont surtout les expériences qui portent sur des sujets enfants qui attireront l'attention, étant donné la visée développementale de la présente étude.

1.2.1 Les expériences avec une plaque occlusale

Il est possible de perturber la parole de plusieurs façons, en modifiant ou non la géométrie du conduit vocal ou en interrompant un certain type de feedback (tactile, auditif, etc.). Une méthode répandue pour étudier l'articulation compensatoire est celle de la plaque occlusale (*bite-block*), qui consiste à perturber un articulateur externe sans pour autant altérer la géométrie du conduit vocal. L'objectif de la plaque occlusale est de placer la mâchoire en position fixe, bloquant ses mouvements verticaux. En contraignant la mâchoire de cette façon, on force le locuteur à recourir à des articulateurs non perturbés pour élaborer des stratégies articulatoires qui diffèrent de ses stratégies habituelles en parole non perturbée. Les tableaux 1.1 et 1.2 présentent les principales caractéristiques méthodologiques des études décrites dans cette section (nombre de sujets, contexte d'apparition des voyelles à l'étude,...). Afin de ne pas alourdir indûment l'exposé, nous ne reprendrons pas ces informations dans le texte.

Ce qui ressort des premières expériences avec des plaques occlusales (Lindblom et Sundberg, 1971; Lindblom et al., 1979; Gay et al., 1981) est le caractère instantané de la compensation faite par le locuteur adulte. En plus d'être instantanée, cette compensation semble être de nature sélective (Gay et al., 1981), puisque des contraintes biomécaniques empêchent la reproduction des fonctions d'aires idéales. De plus, il semble que cela résulte également d'un choix du locuteur de compenser à certains endroits et non à d'autres. Les auteurs proposent alors que la cible d'une voyelle serait codée en terme de spatialité sensorielle, ce qui n'implique pas nécessairement que la cible serait de nature acoustique seulement.

Quelques années plus tard, McFarland et Baum (1995) ont démontré qu'en plus de ne pas être immédiates, les compensations peuvent être incomplètes. La nature incomplète de ces compensations a également été soulevée dans Baum et al. (1996). Les auteurs suggèrent donc que les stratégies compensatoires sont susceptibles de se développer avec le temps, nécessitant peut-être des corrections de type essais et erreurs. Aussi, McFarland et al. (1996) ont fait ressortir une différence importante en ce qui a trait aux expériences de perturbation de la parole : la production des voyelles se trouve plus affectée par une modification d'une

fonction orale (telle que la fixation de la mâchoire par une plaque occlusale) que par une modification d'une structure orale (telle que l'ajout d'un palais artificiel).

Les premières études acoustiques sur des sujets enfants ont fait ressortir l'incapacité de ceux-ci à élaborer des stratégies compensatoires optimales. En effet, les travaux de Gibson et McPhearson (1980) et Oller et MacNeilage (1983) montrent que, bien que les enfants aient été capables d'adopter des stratégies compensatoires, celles-ci ne sont pas aussi efficaces que celles adoptées par les adultes. En effet, les enfants qui ont participé à leurs expériences n'ont pas été capables de compenser complètement pour les voyelles produites avec une plaque occlusale. Les résultats obtenus par Baum et Katz (1988) divergent de ces deux précédentes études, puisqu'ils montrent que dès l'âge de 4 ans, les enfants sont capables de produire des voyelles en condition perturbée acoustiquement comparables à celles en condition normale, et ce dès la première vibration périodique. Baum et Katz (1988) soulignent qu'à un stade du développement où la stabilité formantique des voyelles n'est pas encore atteinte, l'habileté à compenser pour l'ouverture de la mâchoire est tout de même présente. Aussi, les auteurs rappellent qu'il n'est pas rare pour un jeune enfant de parler avec un objet ou de la nourriture dans la bouche, ce qui veut dire que celui-ci a déjà une certaine expérience dans l'articulation compensatoire.

Les résultats obtenus par Edwards (1992) diffèrent de ceux de Baum et Katz (1988). En effet, Edwards a trouvé que les six enfants n'éprouvant pas de problème de langage qui ont participé à son étude n'ont pas parfaitement compensé lorsque l'ouverture de leur mâchoire était fixe et contrôlée par une plaque occlusale. De plus, certains des sujets ayant des problèmes d'ordre phonologique ont éprouvé des difficultés systématiques autant dans la production des voyelles que dans la production des consonnes. Sur la base de ces observations, Edwards suggère que l'équivalence motrice de la parole se développe plus lentement que la capacité de produire des segments phonologiques perceptivement corrects. Cependant, le fait que les enfants soient capables d'élaborer des stratégies articulatoires, bien que celles-ci ne soient pas optimales, tend au contraire à montrer que ceux-ci font tout de même preuve d'une certaine équivalence motrice.

Campbell (1999) s'est également penchée sur le phénomène d'articulation compensatoire à l'aide du paradigme de la plaque occlusale. Les participants de son étude étaient des adultes et des enfants de 4 ans, avec et sans problème d'audition. Ses analyses acoustiques ont révélé que les 6 adultes avec une audition normale avaient effectué une compensation immédiate et substantielle. Cependant, l'auteur a remarqué une grande différence inter-sujets en ce qui a trait aux productions acoustiques : certains sujets sont de bons compensateurs, tandis que d'autres produisent des stratégies compensatoires moins efficaces. Aussi, Campbell a trouvé que pour les locuteurs enfants, le feedback auditif ne joue pas de rôle dans la réorganisation articulaire, ce qui est plutôt surprenant, compte tenu du fait que les enfants ne possèdent pas encore de modèle interne des relations articulatoires-acoustiques robuste. Elle suggère donc que les enfants de cet âge se comportent comme les adultes, mais avec une plus grande erreur résiduelle dans leur production parce que leur connaissance des relations articulatoires-acoustiques est incomplète.

Certains résultats de ces expériences, notamment ceux de Baum et Katz (1988), seraient en accord avec les données articulatoires de Smith et McLean-Muse (1987). Ces derniers ont montré que la vélocité des articulateurs externes (mâchoire et lèvres) était plus grande chez les enfants que chez les sujets adultes lorsque les locuteurs parlent avec une plaque occlusale entre leurs dents, faisant ainsi ressortir le potentiel des enfants à faire une compensation semblable à celle des adultes. Cependant, de récentes études proposent des résultats différents de ceux de Smith et McLean-Muse. En effet, bien que ces derniers aient obtenus des valeurs similaires pour les enfants et les adultes en termes de déplacement, condition normale, de la lèvre inférieure et de la lèvre supérieure (figure 1.1), une étude des trajectoires cinématiques des articulateurs (Green et al., 2002) montre des différences significatives entre les trajectoires des enfants et celles des adultes (figure 1.2). Ces différences varient non seulement en fonction de l'âge, mais aussi en fonction des articulateurs. Ces résultats suggèrent donc un développement séquentiel non linéaire des articulateurs externes. Selon Green et al., le contrôle de la mâchoire serait acquis plus tôt que celui des lèvres, et ceux-ci seraient spécifiquement reliés à l'âge, en raison d'une maturation des mouvements articulatoires différente pour chaque articulateur.

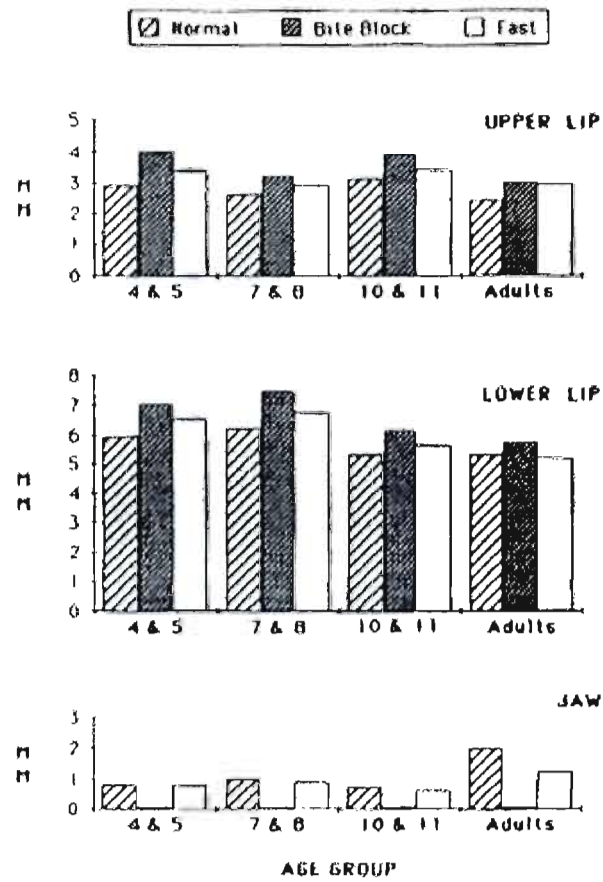


Figure 1.1 Comparaison des valeurs de déplacement (en mm) pour la lèvre supérieure, la lèvre inférieure et la mâchoire pour 3 conditions et 4 groupes d'âge. (Tirée de Smith et McLean-Muse, 1987).

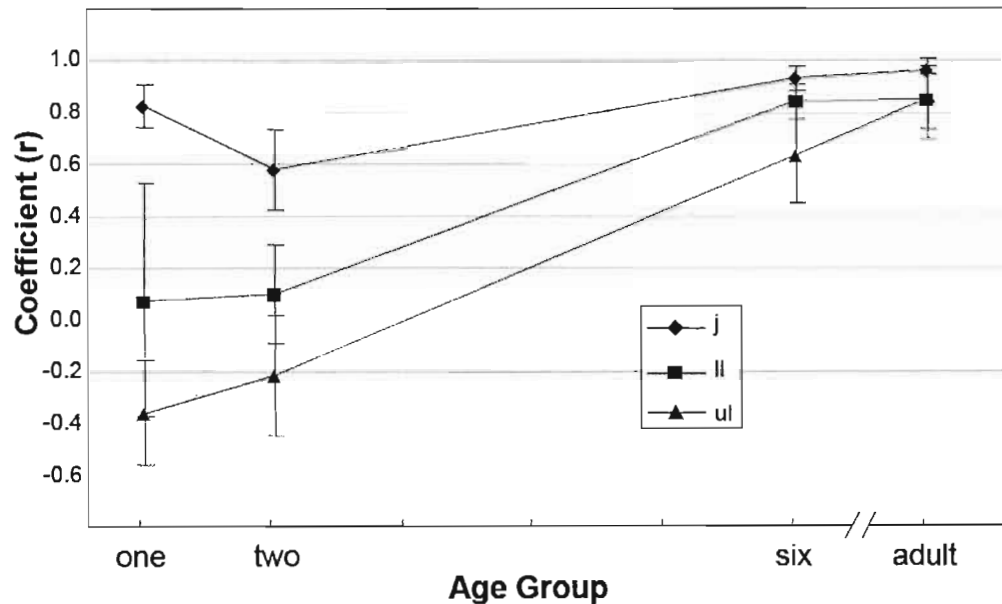


Figure 1.2 Corrélations des trajectoires cinématiques de la mâchoire (j), de la lèvre inférieure (ll) et de la lèvre supérieure (ul) par rapport à la moyenne des trajectoires du groupe adulte. (Adaptée de Green et al., 2002).

Les résultats de l'étude de Ménard et al. (à paraître) sur les corrélats de l'emphase contrastive en français iraient également dans le sens de ceux obtenus par Green et al., appuyant l'hypothèse du développement séquentiel du contrôle moteur des articulateurs. Le fait qu'il y ait des différences articulatoires entre les enfants et les adultes en condition normale (sans perturbation) pourrait donc suggérer une évolution progressive du potentiel compensatoire des enfants. Ce potentiel pourrait être en partie relié à la maturation du contrôle de chaque articulateur, et à la maturation physiologique de l'articulateur lui-même.

Comme le montrent les tableaux 1.1 et 1.2, les résultats des études antérieures divergent, autant chez les adultes que chez les enfants. Plus particulièrement, les raisons pour lesquelles les études de plaque occlusale avec des sujets enfants ont produit de tels résultats ne sont pas très claires, surtout en ce qui a trait aux données acoustiques de production (Baum et Katz, 1988; Campbell, 1999; Edwards, 1992; Gibson et McPhearson, 1980; Oller et MacNeilage, 1983). Edwards (1992) croit que l'origine de cette variation peut être trouvée dans les différences individuelles ou dans une inconstance quant à la tenue de la position de la mâchoire lorsque la plaque occlusale était présente. L'hypothèse des différences individuelles

est probable puisque le nombre de sujets n'était jamais très élevé, sauf pour Baum et Katz (1988) qui ont étudié 10 sujets enfants, séparés en deux groupes d'âge. De plus, McFarland et Baum (1995) et Campbell (1999) ont noté de grandes différences interindividuelles dans ce type d'expérience. En ce qui a trait à la position inconstante de la mâchoire, cette hypothèse est peu plausible puisque les études plus récentes (Baum et Katz, 1988; Edwards, 1992; Campbell, 1999) ont toutes utilisé des plaques occlusales formées à partir de matériel dentaire et adaptées aux sujets, tel que suggéré par Netsell (1985), limitant ainsi les mouvements mandibulaires. Aussi, l'importance de ce facteur peut être facilement quantifiée et vérifiée grâce à des données articulatoires de la mâchoire, couplées aux données acoustiques, ce qui n'a été fait par aucune de ces études.

Tableau 1.1 Résumé des résultats des expériences à l'aide d'une plaque occlusale (sujets adultes)

Étude	Sujets	Stimuli	Type d'analyse	Résultats (qualité de la compensation)	
				Production	Perception
Lindblom et al. (1979)	6 adultes	[a],[i],[u],[o]	acoustique	Complète (valeurs $\leq \pm 3$ s)	
Fowler et Turvey (1980)	8 adultes (production) 11 adultes (perception)	[a],[i],[u],[o],[ɛ],[ɔ],[ʌ]	acoustique	Incomplète (Effet significatif sur F2 (F[1,6]=41.2, p<0.001))	Incomplète (71% à 90% d'identifications correctes)
Gay et al. (1981)	5 adultes	[a],[i],[u],[o] en contexte V - V - V	acoustique et articulatoire (rayons X)	Complète (patrons formantiques non significativement différents)	
Kelso et Tuller (1983)	5 adultes	[a],[i],[u] isolées et en contexte [p]-V-[p]	acoustique	Complète (aucune différence significative entre les valeurs formantiques pour 4 sujets sur 5)	
McFarland et Baum (1995)	15 adultes	[a],[i],[u] [p],[t],[k],[s],[ʃ]	acoustique	Incomplète (valeurs de f1 et f2 significativement plus élevées)	
Baum et al. (1996)	10 adultes	[a],[i],[u] [p],[t],[k],[s],[ʃ]	acoustique		Incomplète (surtout pour [i], qui a été mal perçu dans 21% des cas en condition « large bite-block »)

Tableau 1.2 Résumé des résultats des expériences à l'aide d'une plaque occlusale (sujets enfants)

Étude	Sujets	Stimuli	Type d'analyse	Résultats (qualité de la compensation)	
				Production	Perception
Gibson et McPhearson (1980)	5 enfants de 6-7 ans	[a],[i],[u],[ʊ] en contexte V - V - V	acoustique	Incomplète (valeurs formantiques significativement différentes)	Incomplète (taux de mauvaises identifications significativement plus élevé pour la condition perturbée)
Oller et MacNeilage (1983)	2 enfants, 4 et 8 ans	[i], [ae] en contexte V - V - V	acoustique	Incomplète (inconstance élevée de R2 (sd de 553 à 891) pour un sujet)	Incomplète (taux de mauvaises identifications significativement plus élevé pour les conditions perturbées)
Smith et McLean-Muse (1987)	10 enfants (3 groupes : 5;3,8;0,10;9) 10 adultes	[p],[b],[f],[v],[m],[a],[i], [o],[I]	articulatoire	Complète (patrons de vitesse, de déplacement et de durée des sujets enfants semblables à ceux des adultes. Aucune différence significative quant aux pics de vitesse pour les différentes conditions)	

Baum et Katz (1988)	10 enfants, 2 groupes (5;2, 8;4)	[a],[i],[u] en contexte V - V	acoustique	Complète (Différences minimales des valeurs formantiques (1Hz - 68Hz))
Edwards (1992)	10 enfants (4 avec troubles phonologiques) moyenne 4 ans	[i],[I],[ae]	acoustique	Incomplète (Valeurs de F1 et F2 significativement moins élevées en condition perturbée)
Campbell (1999)	6 adultes, 6 enfants (moyenne 4ans)	[i],[I],[ae]	acoustique	Incomplète (Sujets normaux : différence significatives des valeurs moyennes de F1 et F2 pour les deux groupes)

1.2.2 Les expériences avec un tube labial

Les expériences avec un tube labial agissent sur une zone de constriction différente de celle ciblée par une plaque occlusale et apportent des données supplémentaires pertinentes en ce qui a trait au phénomène d'articulation compensatoire. Il est difficile de vérifier si les résultats des études avec un tube labial présentent la même inconstance puisque seulement trois études ont été faites à l'aide de ce type de perturbation : deux avec des locuteurs adultes (Savariaux et. al., 1995, 1999; Cocusse 1996) et une avec des locuteurs enfants (Ménard et al., 2004).

Cependant, bien avant ces expériences, Riordan (1977) avait déjà eu l'idée de perturber la fonction d'aire du conduit vocal en contraignant la protrusion des lèvres, et ce afin d'étudier le déplacement vertical compensatoire du larynx lors de la production des voyelles [i],[y],[u],[e] et [ə]. Bien qu'à l'époque les équipements d'acquisition de mesures articulatoires n'étaient pas aussi sophistiqués que de nos jours, il est intéressant de voir la configuration expérimentale adoptée (figure 1.3).

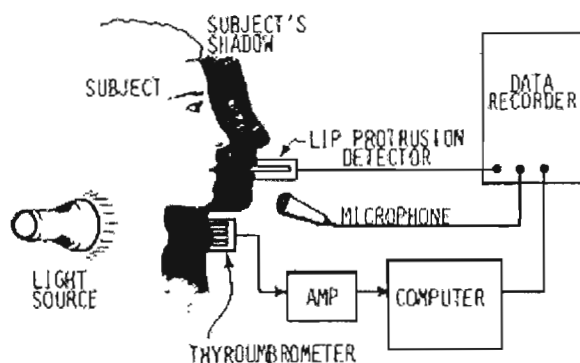


Figure 1.3 Configuration expérimentale utilisée par Riordan (1977) afin d'étudier la protrusion des lèvres et le déplacement du larynx.

Riordan a utilisé un tube de métal de $\frac{1}{4}$ de pouce (0,63 cm) de diamètre pour forcer une protrusion lors de la production des voyelles. Au lieu d'utiliser un tube labial de plus grand diamètre pour empêcher cette protrusion, il a placé une bande adhésive sur la lèvre supérieure. Riordan a noté que la protrusion pour [u] était plus importante que pour [y] et

qu'il n'y avait aucune différence significative entre les conditions sur le plan acoustique. Les résultats de Riordan portent donc à croire que la position des lèvres n'est pas un élément crucial pour la production des voyelles arrondies. À l'aide de simulations informatiques, il a trouvé qu'un déplacement du larynx accompagné de changements dans la position de la langue pouvait compenser pour une perturbation d'aire aux lèvres. C'est d'ailleurs ce qu'il a observé chez la majorité de ses locuteurs (4 sujets sur 6 abaissaient significativement le larynx pour compenser la perturbation). Cependant, il indique que d'autres stratégies compensatoires peuvent être adoptées, comme par exemple l'ajustement de la position de la lèvre inférieure. Certes les résultats obtenus par Riordan (1977) peuvent être contestables étant donné la technique utilisée pour modifier l'aire aux lèvres, mais il reste tout de même que ce fut une des premières études à utiliser un tube labial.

En utilisant un tube labial de 2,5 cm de diamètre placé entre les lèvres, Savariaux et al. (1995,1999) ont fait prononcer la voyelle [u] dans cette condition de perturbation en recueillant des données acoustiques et articulatoires de 11 locuteurs adultes du français. L'analyse cinéradiographique des données articulatoires couplées aux données acoustiques a permis de voir que les locuteurs n'ont pas tous compensé cette perturbation au même degré, même qu'aucun locuteur n'a été capable de faire une compensation instantanée complète. Cependant, à la suite d'une phase d'adaptation et d'une importante réorganisation articulatoire, un des locuteurs est parvenu à faire une compensation complète tandis que 3 autres ont fait des améliorations marquées. Les résultats des tests perceptifs montrent que même si la majorité des voyelles ont été bien identifiées, la qualité de celles-ci en condition perturbée a été jugée inférieure à celles produites en condition non perturbée. Cependant, il semble que même si les locuteurs sont incapables de rencontrer les conditions nécessaires pour produire une certaine voyelle, ceux-ci ont tout de même une bonne représentation sensori-acoustique de celles-ci (Savariaux et al., 1999). Dans le cas de la voyelle [u], cette représentation serait un espace acoustique composé de F0, F1 et F2. Les espaces acoustiques F2-F0 (en bark) et F1 seraient les valeurs qui caractériseraient le mieux la position haute et

arrière de la langue lors de la production de cette voyelle par des adultes, permettant de bien faire ressortir le caractère grave¹ de celle-ci.

Après avoir observé les résultats de Savariaux (1996), notamment concernant les variations de la fréquence fondamentale en condition perturbée, Cocusse (1996) a répété la même expérience en voulant stabiliser la fréquence fondamentale lors des productions. Selon Cocusse, s'il y a variation de F0 pour compenser la perturbation, c'est un phénomène associé soit à la perturbation elle-même, ou alors associé à un contrôle réflexe au niveau du système central. Parmi les 7 locuteurs ayant réussi à stabiliser leur fréquence fondamentale lors des répétitions, 3 ont réussi à compenser totalement à la suite d'une phase d'entraînement consistant en un guidage articulatoire à partir de la voyelle [o]. Le fait qu'un nombre relativement plus important de locuteurs aient réussi à compenser dans ces conditions par rapport à Savariaux et al. (1995, 1999) suggère que la variation de fréquence fondamentale serait un réflexe qui serait susceptible de nuire au locuteur dans l'élaboration de sa stratégie de compensation. Donc, le fait d'effectuer un guidage articulatoire tout en stabilisant la fréquence fondamentale a une influence directe sur l'efficacité compensatoire du locuteur, qui s'en trouve améliorée.

Ménard et al. (2004) ont également guidé articulatoirement les sujets enfants de leur expérience lors de la production de la voyelle [u] avec un tube labial de 1,5 cm de diamètre. Douze enfants ont participé à cette expérience. Même si les résultats des tests de production ne montrent pas de compensation totale pour la majorité des sujets, ceux des tests de perception indiquent que tous les enfants ont été capables de faire cette compensation puisque pour chaque sujet, au moins un des [u] produits en condition perturbée a été jugé comme étant de qualité égale ou supérieure aux [u] de la condition normale préperturbation. Cependant, l'utilisation du feedback faite par les enfants (productions de type essai/erreur) suggère que le modèle interne de ces derniers est incomplet. Toutefois, même si ces locuteurs

¹ Le terme grave est un des traits distinctifs permettant de distinguer les voyelles entre elles. Issu du système de traits de Jakobson (1963), grave est opposé à aigu et se dit d'un son où l'énergie spectrale est concentrée dans les basses fréquences.

n'ont pas terminé l'élaboration de leur modèle interne, il est intéressant de voir que quelques-uns ont montré des signes d'effet post-perturbation.

Contrairement aux expériences avec une plaque occlusale, ces dernières études avec un tube labial montrent que, pour une perturbation qui affecte la fonction d'aire du conduit vocal, les compensations ne sont pas spontanées et requièrent un apprentissage. Ces expériences renforcent l'hypothèse selon laquelle, lors de la production de la parole, les gestes articulatoires visent à atteindre une cible de nature acoustico-auditive (Perkell et al., 1993; Perkell et al., 2000).

1.3 Le rôle du feedback dans la production de la parole

Les études de compensations articulatoires lors de l'introduction d'un tube labial confirment l'importance du feedback auditif dans l'élaboration des stratégies articulatoires, contrairement à ce qui a été proposé par Campbell (1999). Le rôle du feedback auditif a également été souligné par Jones et Munhall (2003), qui ont modifié la géométrie du conduit vocal en augmentant la longueur des incisives supérieures à l'aide de prothèses dentaires. Les productions de [s] et [ʃ] faites lorsque le feedback auditif était disponible ont été jugées meilleures que celles faites lorsque le feedback était masqué et un important effet d'apprentissage a été observé pour tous les locuteurs à toutes les sessions. Ces résultats démontrent que le signal acoustique aide les locuteurs à transposer les modifications nécessaires en termes de configuration articulatoire.

Tout comme Campbell (1999), Lane et al. (2005) ont également utilisé le paradigme de la plaque occlusale pour étudier une population ayant des problèmes d'audition, c'est-à-dire les adultes atteints de surdité à un stade post-linguistique. Leur travail a été basé sur le modèle DIVA (Guenther et Perkell, 2004), qui est un modèle neurocomputationnel reposant sur la théorie du contrôle moteur de Perkell et al. (2000) (figure 1.4). Ce modèle sera ici adopté puisqu'il représente adéquatement l'apport des différents types de feedback dans la production de la parole.

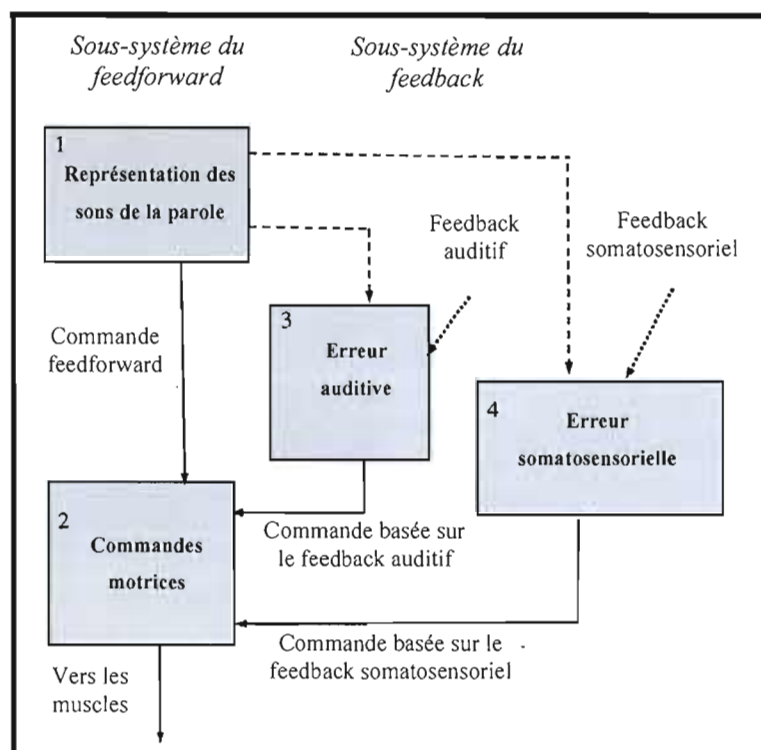


Figure 1.4 Schéma du modèle DIVA. (Adaptée de Lane et al. (2005)).

Dans ce modèle, les représentations des sons, des syllabes et des mots sont stockées dans la mémoire à long terme (1). La production des sons de la parole est contrôlée par deux systèmes de commandes. Le premier, dit *feedforward*, repose sur les relations articulatoire-acoustiques internalisées par le locuteur et ne fait pas appel au *feedback* auditif. C'est en grande partie à partir de ces commandes que les sons sont contrôlés chez les adultes (boucle fermée). Selon Perkell *et al.* (2002), ce modèle des relations articulatoire-acoustiques serait internalisé durant la phase d'acquisition du langage. Ce système de commandes feedforward est maintenu par le système de contrôle par feedback auditif. La production d'une séquence implique l'activation de deux groupes de projections : les projections de type feedback et les projections cibles auditives et s'il n'y a pas concordance entre les deux éléments (3), le locuteur est guidé vers des corrections des commandes motrices (2) à l'aide du feedback auditif. Un même guidage est effectué pour la correction d'erreur (4) et l'atteinte de la cible somatosensorielle. En ce qui a trait au rôle du feedback auditif, le modèle DIVA lui confère

la tâche de réviser les commandes feedforward contrôlant les trajectoires entre les cibles phonémiques.

Dans leur étude, Lane et al. ont remarqué que la taille des espaces vocaliques (moyenne des distances euclidiennes entre toutes les paires possibles de voyelles) des locuteurs sourds avec un implant auditif étaient plus petits lorsque ce dernier était hors fonction que lorsqu'il fonctionnait. Les mêmes observations ont été faites pour les conditions avec et sans plaque occlusale. Les résultats de Lane et al. (2005) confirment donc le rôle du feedback auditif et démontrent l'importance pour un modèle d'assigner un tel rôle au feedback auditif. Ces résultats vont donc à l'encontre de Campbell (1999), qui minimise l'importance du feedback auditif dans la production de la parole.

Il n'y a pas seulement le feedback auditif qui joue un grand rôle dans ce modèle. La proprioception et les sensations somatosensorielles sont des éléments indispensables. L'interruption de ces types de feedbacks est un moyen supplémentaire de perturber la parole et est l'élément sur lequel se sont penchées plusieurs études, entre autres Borden (1976) et Kelso et Tuller (1983).

Borden (1976) a étudié le rôle du feedback tactile chez les enfants en faisant une anesthésie partielle. Le nerf mandibulaire a ainsi été bloqué par anesthésie et les sensations tactiles de la langue ont été partiellement inhibées. Les résultats montrent que dès l'âge de 4 ans, les enfants détiennent un système de production de la parole pouvant fonctionner par moments sans même l'information tactile donnée par la langue, si l'information proprioceptive est disponible.

Kelso et Tuller (1983) ont étudié les rôles des différents types de feedback lors de la production de la parole. Dans cette expérience, les locuteurs ont eu à prononcer des stimuli dans diverses conditions : 1 - avec une plaque occlusale entre les dents; 2 - sous anesthésie du joint mandibulaire, les privant ainsi de proprioception; 3 - sous anesthésie de la muqueuse orale, les privant ainsi de feedback tactile; 4 – sans feedback auditif. Ce qu'ils ont observé

peut surprendre, à savoir seulement 1 des 5 sujets n'a pas fait de compensation complète et immédiate, et ce, pour seulement une voyelle dans une seule condition. Les auteurs comparent cette capacité compensatoire à celle du système respiratoire, cette analogie rendant compte de la capacité compensatoire générative du corps humain.

Toutes ces études montrent bien que le feedback auditif n'est pas le seul à jouer un rôle dans le processus de production de la parole. Les autres types de feedback ne sont pas à négliger et sont des éléments dont il faut tenir compte lorsqu'il s'agit de faire un lien avec les théories de perception de la parole. Cependant, une récente étude de Tremblay et al. (2002) a suggéré que le feedback auditif n'était pas l'élément principal qui guide le locuteur dans sa tâche. En effet, à la suite de cette expérience où la mâchoire a été perturbée lors de la production de stimuli de parole et de stimuli non parole, les auteurs croient que leurs résultats représentent des différences dans la spécification des cibles dans le domaine articulatoire : la variation temporelle de l'information somatosensorielle lors des mouvements fait partie de l'objectif de la production de la parole, tandis que ce n'est pas le cas pour les mouvements en condition non-parole. Ces observations confirment donc l'hypothèse d'une représentation articulatoire de l'objectif du processus de production de la parole dans le cerveau du locuteur.

De ces expériences, il est possible de constater qu'un seul type de feedback n'est pas suffisant pour aider le locuteur dans sa tâche et que la représentation de la tâche du locuteur n'est pas unimodale. Cette proposition va donc dans le sens de Perrier (2005) :

«...the representation of the speech production task in the speakers' brain is probably not purely acoustic and not purely articulatory» (Perrier, 2005, p.126).

Cependant, les résultats de plusieurs expériences de perturbations avec une plaque occlusale ou un tube labial constituent des arguments de taille en faveur du feedback auditif comme étant le principal type de feedback. Aussi, tel que mentionné par Perrier (2005), aucune étude n'a eu de résultats où les locuteurs acceptaient des changements acoustiques afin de préserver une certaine configuration articulatoire :

«We are not aware of experiments where the speakers accepted changes in the acoustical output, in order to preserve specific articulatory properties. Hence, it can be logically hypothesized that the acoustic component of the speech production task's representation is essential, primary, and that the articulatory components are of secondary importance» (Perrier, 2005, p.127).

Finalement, pour conclure sur le rôle du feedback et son lien avec les théories de la perception, il serait bon de reporter les propos de Fowler, instigatrice de la *Direct Realist Theory* :

«The acoustic signal is, after all, what the ear transduces; ears do not transduce articulations. The theories do not disagree on this point; they disagree on what the acoustic signal counts as for the perceiver» (Fowler, 1996, p.1737).

1.4 Description des voyelles à l'étude

Les expériences de perturbation à l'aide d'un tube labial relatées précédemment (Savariaux et al. 1995, 1999; Cocusse 1996; Ménard 2004) se sont concentrées sur la voyelle [u]. Dans cette partie, les justifications de l'utilisation de cette voyelle et des autres utilisées dans la présente étude, soit [i] et [y], seront présentées et les différences entre ces voyelles seront expliquées à l'aide de la *Théorie Dispersion-Focalisation* (Schwartz et al., 1997).

Les voyelles orales du français peuvent facilement se caractériser acoustiquement par leurs valeurs formantiques. Si l'on se concentre spécifiquement sur les voyelles /i y u a/, on remarque que celles-ci occupent les positions extrêmes du trapèze vocalique dans les plans F1 vs F2 et F2 vs F3. La figure 1.5 présente schématiquement ces voyelles dans l'espace acoustique.

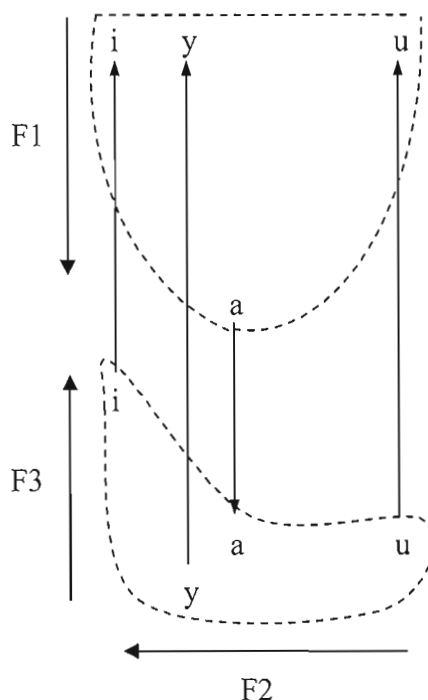


Figure 1.5 Visualisation des espaces vocaliques des voyelles du français et emplacement des prototypes des voyelles [a], [i], [y] et [u]. (Tirée de Ménard et Boë, 2004).

De par leurs positions extrêmes dans l'espace vocalique acoustique, ces voyelles ont également un statut privilégié en termes de distances interformants (critère local, pour une voyelle donnée) et de distances intervoyelles (critère de stabilité du système, entre les voyelles). En effet, dans une étude visant à prédire les inventaires vocaliques les plus fréquents des langues du monde, Schwartz et al. (1997) proposent la Théorie de la Dispersion-Focalisation (Schwartz et al., 1997) selon laquelle les systèmes vocaliques peuvent être reliés à l'action de deux contraintes : une dispersion structurale basée sur les différences perceptuelles intervocaliques et une focalisation locale, basée sur la saillance perceptuelle intravocalique (convergence entre deux formants). Ces deux contraintes ont pour but de fournir des caractérisations perceptives des voyelles en montrant la convergence entre deux formants (Stevens, 1989). Selon cette théorie, l'objectif du locuteur lors de la production de voyelles sera donc, entre autres, de minimiser la différence entre les valeurs de

certaines formants, rendant ainsi la perception de cette voyelle optimale. Les proximités formantiques (là où se réalise la focalisation) seraient donc les suivantes :

- [a] : F1 maximal (focalisation de F1 et F2 à leur position moyenne la plus haute);
- [i] : focalisation de F3 et F4, impliquant F2 et F3 maximaux;
- [y] : focalisation de F2 et F3;
- [u] : F1 et F2 minimaux (focalisation de F1 et F2 à leur position moyenne la plus basse).

En se basant sur la position relative des voyelles dans les espaces vocaliques maximaux, des valeurs acoustiques de prototypes² vocaliques peuvent être déterminées. La figure 1.6 représente les valeurs de F1, F2, F3 prototypiques des voyelles orales des langues du monde pour un homme adulte (Schwartz et al., 1997) (les voyelles du français sont en rouge).

² Noter que le terme « prototypes » fait référence ici à une position canonique dans l'espace acoustique, et non à une représentation abstraite invariante.

trait au lieu d'articulation, les voyelles perçues antérieures ([i y e ø ε œ]) sont reliées à $F2-F1 > 5$ Bark et les perçues postérieures ([u o ɔ]), à $F2-F1 < 5$ Bark. Conformément à ce que Schwartz et al. (1993) ont trouvé, $F2'$ s'est révélé un indice pouvant rendre compte du caractère invariant des voyelles arrondies [y ø œ]. Dans leur étude, Schwartz et al. (1993) notent deux patrons différents résultant du geste d'arrondissement fait pour passer de [i] à [y] ont été remarqués : une forte baisse de $F3$ avec un $F2$ stable, ou alors une baisse de $F2$ et $F3$. $F2'$ s'est alors avéré le meilleur facteur pour rendre compte des différentes stratégies menant à la focalisation nécessaire à la réalisation du contraste [i/y]. $F2'$ est une somme pondérée de $F2$, $F3$ et $F4$ et est calculé à l'aide de l'équation suivante (toutes les valeurs sont en Bark) :

$$F2' = (c_2F2 + c_3F3 + c_4F4) / (c_2 + c_3 + c_4), \text{ où } c_2 \geq c_3 \geq c_4, \text{ pour } c_i \neq 0$$

La Figure 1.7 représente schématiquement l'algorithme de calcul de $F2'$:

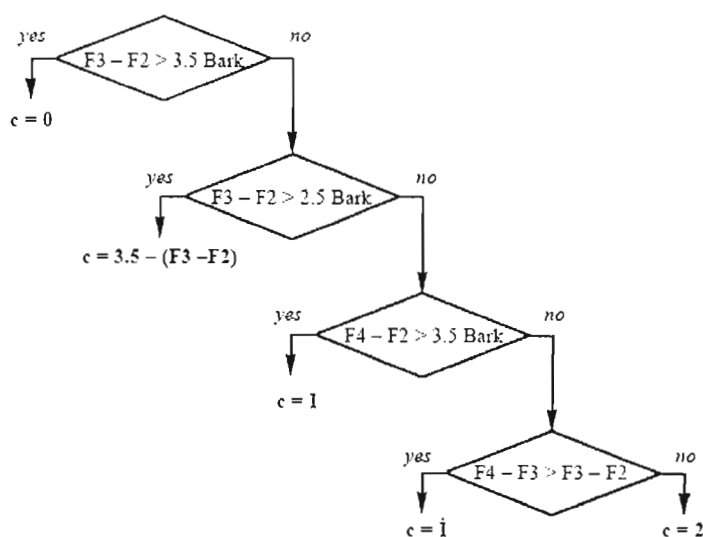


Figure 1.7 Algorithme de calcul de $F2'$. (Tirée de Schwartz et al., 1997).

D'un point de vue géométrique, les voyelles peuvent être représentées comme une succession de tubes formés par les différentes cavités du conduit vocal. Un modèle efficace pour le calcul des fréquences de résonance est celui du modèle à 4 tubes de Fant (1960), représenté

par la figure 1.8. Ce modèle est gouverné par 3 paramètres, à savoir (1) l'emplacement de la constriction faite par la langue, (2) l'aire de la constriction faite par la langue et (3) le rapport longueur/aire de la constriction aux lèvres.

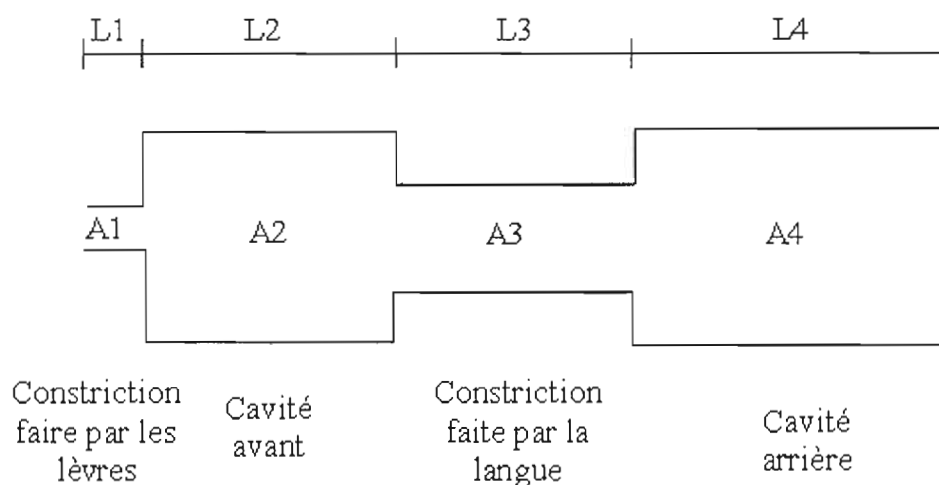


Figure 1.8 Représentation du conduit vocal à l'aide d'un modèle 4 tubes. À chaque section est associée une aire (A) et une longueur (L) à partir desquelles les fréquences peuvent être calculées.

Les résonateurs ainsi créés peuvent être de trois types : Helmholtz, tubes ouvert-ouvert ou fermé-fermé et tube ouvert-fermé. La résonance d'une cavité ayant un important volume et une petite aire de constriction sera de type Helmholtz, et la fréquence de cette résonance peut être obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$F = \left(\frac{c}{2\pi k} \right) \sqrt{\left(\frac{A_{co}}{L_{co} V_{ca}} \right)}, \text{ où } c = \text{vitesse du son (350 m/s)}$$

k = constante

A_{co} = aire de la constriction (cm^2)

L_{co} = longueur de la constriction (cm)

V_{ca} = volume de la cavité (cm^3)

Il existe deux types de résonateurs tubes : les tubes fermés à une extrémité (ou suivis d'une cavité de petite dimension) et les tubes ouverts ou fermés aux deux extrémités. Les équations pour calculer les fréquences de résonance de ces tubes sont les suivantes : $F = (2n-1)c/4L$ pour le tube ouvert-fermé et $F = nc/2L$ pour les autres tubes, où n est égal à un nombre naturel (1,2,3,...) et L correspond à la longueur de la cavité (cm). Ces fréquences sont respectivement appelées quart d'onde ($\lambda/4$) et demi-onde ($\lambda/2$).

Lors de la production de voyelles pour lesquelles l'aire de constriction est petite ([i y u a]), il est possible de relier la fréquence de résonance d'une cavité à un formant.³ On obtient ainsi des affiliations formants-cavités. L'identification de ces affiliations chez l'adulte se fait assez simplement par modélisation, comme le présente le tableau 1.1.

Tableau 1.1 Affiliations formants-cavités pour l'homme adulte du modèle VLAM
(Adapté de Ménard 2002)

Voyelle	F1	F2	F3
[a]	cavité arrière $\lambda/4$	cavité avant $\lambda/4$	cavité arrière $3\lambda/4$
[i]	Helmholtz cavité arr. + constr.	cavité arrière $\lambda/2$	cavité avant $\lambda/2$
[y]	Helmholtz cavité arr. + constr.	cavité avant $\lambda/2$	cavité arrière $\lambda/2$
[u]	Helmholtz cavité avant + lèvres	Helmholtz Cavité arr. + constr.	cavité arrière $\lambda/2$

La connaissance de ces affiliations formants-cavités permet de prédire l'effet de la croissance non uniforme du conduit vocal sur les valeurs géométriques et acoustiques des voyelles. Puisque nous nous inscrivons dans le cadre théorique du contrôle de la parole par des buts acoustico-auditifs, de telles prédictions deviennent cruciales pour déterminer si des stratégies

³ Pour les autres voyelles, pour lesquelles l'aire de constriction est plus importante, les valeurs formantiques ne peuvent pas aussi aisément être reliées aux résonances de cavités individuelles, compte tenu du couplage important entre les cavités.

articulatoires différentes sont impliquées pour l'atteinte de cibles acoustico-auditives similaires.

Pour la voyelle [u], dont les cavités avant et arrière ont des résonances de type Helmholtz, il en résultera 2 formants de basse fréquence, étant donné les grandes dimensions des cavités. Ces mêmes fréquences pour un [u] peuvent être obtenues à partir de plus d'une forme de conduit vocal. En effet, Boë et al. (2000) ont trouvé trois différents [u] possibles : vélo palatal, vélo pharyngal et pharyngal. Cependant, le fait qu'il soit possible de produire de pareils sosies vocaliques ne signifie pas que la production de cette voyelle en soit facilitée. Comme le rappellent Abry et Badin (1996), le contrôle musculaire pour cette voyelle est assez complexe, puisqu'il implique 3 manœuvres : une constriction aux lèvres (*orbicularis oris*), un recul du corps de la langue (styloglosse et stylohyoïde) et une déconstriction du pharynx (génioglosse postérieur) (MacNeilage et Davis, 1990). Des ajustements précis de certains muscles linguaux sont également nécessaires pour arquer suffisamment la langue (MacNeilage et Sholes, 1964). Sur ce plan, certaines différences articulatoires sont présentes lors de la production de la voyelle [u] par l'adulte et par l'enfant. Selon Ménard (2002), lors d'une étude de voyelles simulées par un modèle articulatoire chez l'adulte et l'enfant, il semble que les lèvres soient plus ouvertes et que le corps de la langue soit plus antérieur chez l'enfant, diminuant ainsi la valeur de F_2 . Ces compensations de la langue et des lèvres diminueraient progressivement au cours de la croissance du conduit vocal.

Pour [i], on sait que les valeurs formantiques des enfants peuvent être obtenues par une multiplication de celle des adultes (Fant 1966). Les stratégies articulatoires lors de la production de cette voyelle restent donc les mêmes, malgré les différences anatomiques importantes, et sont les suivantes : les lèvres sont écartées et la langue est élevée et dans une position frontale, créant une grande cavité arrière et une petite cavité avant.

La différence majeure dans l'articulation du [y] par rapport au [i] est l'arrondissement des lèvres. Cette protrusion a pour effet de diminuer la valeur du formant affilié (F_3), puisqu'elle allonge la cavité avant. Pour le jeune enfant, cet avancement des lèvres aura pour effet de créer une cavité avant plus longue que la cavité arrière. Cependant, le rapport entre les

dimensions des cavités évoluera proportionnellement au développement de l'enfant, ce qui influencera directement les fréquences associées, nécessitant ainsi une certaine adaptation articulatoire. Ménard et al. (2003) a montré que cette adaptation, en l'occurrence l'avancement du corps de la langue, était faite dans le but d'atteindre une certaine focalisation, qui était cependant réalisée au détriment de l'intelligibilité.

L'étude des voyelles [i] et [y] dans une étude portant sur l'équivalence motrice permettra d'étudier les stratégies utilisées pour produire le contraste [i/y] en français, puisque la perturbation choisie (voir chapitre II) forcera le locuteur à rendre cette opposition plus saillante. Les voyelles cardinales [a], [i], [y] et [u] constituent de bons candidats pour étudier ce phénomène chez les enfants puisque ce sont celles délimitant les positions extrêmes du trapèze vocalique et sont acquises dès l'âge de 2 ans (Kent, 1992). Finalement, un critère important est la variance au niveau du type de feedback lors de la production de ces voyelles. En effet, étant donné le contact de la langue avec le palais, il y a un feedback somesthésique plus important pour [i] et [y] que pour [a] et [u]. Tous ces éléments font en sorte que ces voyelles permettront d'étudier efficacement le phénomène étudié et les âges ciblés.

1.5 L'ultrasonographie comme technique d'imagerie de la surface de la langue

L'utilisation d'appareils à ultrasons pour étudier la parole n'est pas chose récente. En effet, cette technologie est utilisée en phonétique depuis plus de 30 ans. Plus récemment, l'arrivée des appareils à ultrasons portables, de la vidéo numérique et des logiciels d'analyse d'image a fait en sorte que l'ultrasonographie est une technologie de plus en plus répandue pour l'étude de la parole. De nos jours, non seulement les appareils à ultrasons peuvent être utilisés en laboratoire, mais ils peuvent également être facilement transportés pour étudier des locuteurs en régions éloignées (Gick 2002).

Avant d'étudier les images obtenues par un appareil à ultrasons, il est important de décrire la façon dont celles-ci sont obtenues. Tout d'abord, l'appareil envoie des impulsions sonores de hautes fréquences (1 à 5 MHz) en faisant vibrer un cristal piézoélectrique à l'intérieur d'une

sonde. Ensuite, les ondes voyagent dans le corps en frappant des frontières organiques (entre les milieux aqueux et les tissus mous, les tissus mous et l'air, les tissus mous et les os, etc.). À la suite de cette rencontre, une partie des ondes est renvoyée à la sonde tandis que les autres voyagent jusqu'à la prochaine frontière. Les ondes réfléchies sont captées par la sonde et transmises à la machine. L'appareil calcule la distance entre la sonde et les tissus en fonction de la vitesse de propagation des ondes dans ces tissus. L'appareil affiche les distances et les intensités des échos sur l'écran, formant une image bidimensionnelle comme celle de la figure 1.9 : Il est à noter que désormais, toutes les Figures représentant une langue ou un conduit vocal seront orientées de la même façon, c'est-à-dire avec l'apex de la langue à droite, et la racine à gauche.

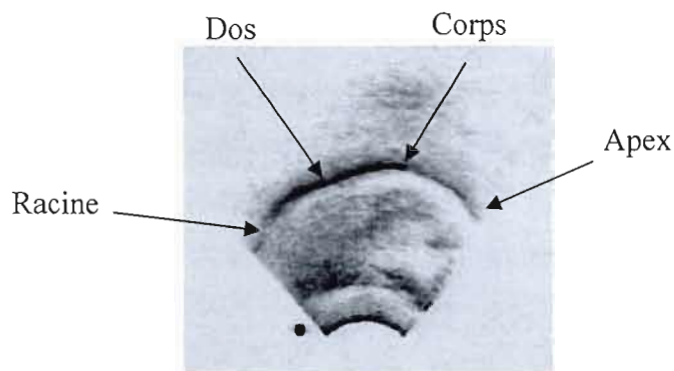


Figure 1.9 Coupe sagittale de la langue lors de la production de la voyelle [a].

La surface de la langue correspond à la limite inférieure de la trace reflétée par les ondes (qui apparaît ici en noir). Des programmes de détection de contours peuvent ensuite être utilisés pour tracer cette surface (figure 1.10). Au terme de cette dernière étape, les images sont prêtes à être analysées.

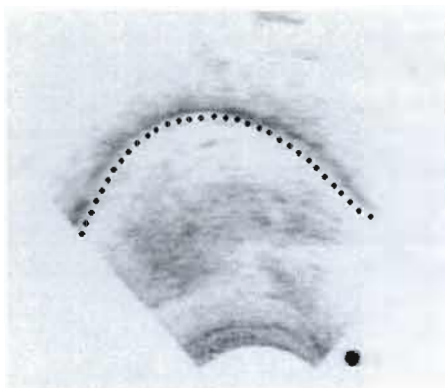


Figure 1.10 Surface de la langue détectée semi-automatiquement par le logiciel de détection de contours Edgetrak (© Video/Image Modeling and Synthesis Lab, University of Delaware).

1.5.1 Possibilités et limites

La nature non invasive et inoffensive des ultrasons permet son utilisation sans restriction puisqu'à présent, aucune étude n'a démontré d'effets secondaires néfastes. C'est donc l'outil de choix pour étudier la production de la parole chez des enfants, des gens âgés, des personnes partiellement glossectomisées, etc.

L'image obtenue de l'appareil à ultrasons affiche la surface de la langue presque totalement, de la racine jusqu'à l'apex. Celui-ci est rarement visible au complet étant donné qu'il n'est pas rattaché au plancher du conduit vocal et que l'air sous l'apex empêche la propagation des ondes. De plus, étant situé précisément au-dessus de la mâchoire, cette dernière crée une ombre (les ondes sont reflétées par l'os de la mâchoire et ne peuvent se rendre à l'apex), faisant en sorte qu'on ne peut apercevoir l'apex totalement que lors de productions où la langue est en position arrière, telle que lors de la prononciation d'un [u]. La racine de la langue elle aussi n'est pas souvent observable en totalité, puisque l'os hyoïde crée une ombre. Des exemples de ces zones d'ombres sont présentés à la figure 1.11.

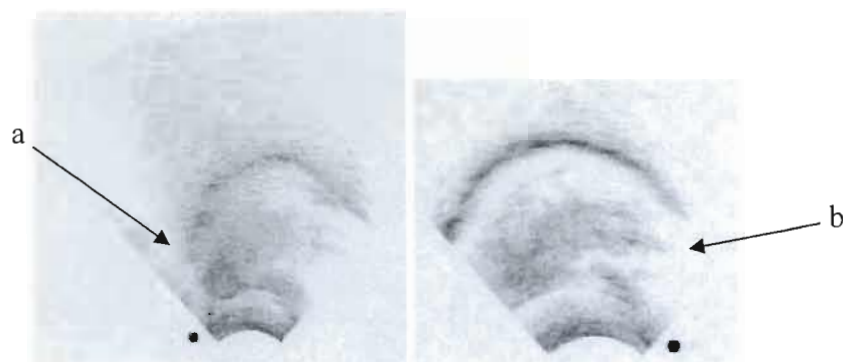


Figure 1.11 Ombres créées par l'os hyoïde (a) et la mâchoire (b).

Il arrive également parfois que le contour ne soit tout simplement pas visible à un endroit particulier où il devrait l'être. Cela peut être dû à des raisons physiologiques (le sujet a une langue particulière, présence de piercing, etc.). En effet, la nature de l'ultrasonographie fait en sorte que les ondes sont sensibles aux caractéristiques individuelles de la langue, comme par exemple le pourcentage de tissus adipeux. De plus, étant donné l'absence d'articulateur passif sur l'image, aucune référence en temps réel n'est directement visualisable, d'où l'importance d'empêcher la sonde et la tête de bouger. Pour pallier cette lacune, plusieurs systèmes ont été développés par différents laboratoires (*Arizona Phonological Imagery Lab (APIL)*, University of Arizona, *Haskins Laboratories*, Yale University, *Interdisciplinary Speech Research Laboratory (ISRL)*, University of British Columbia, *Vocal Tract Visualization Laboratory (VTV)*, University of Maryland) (figure 1.12).

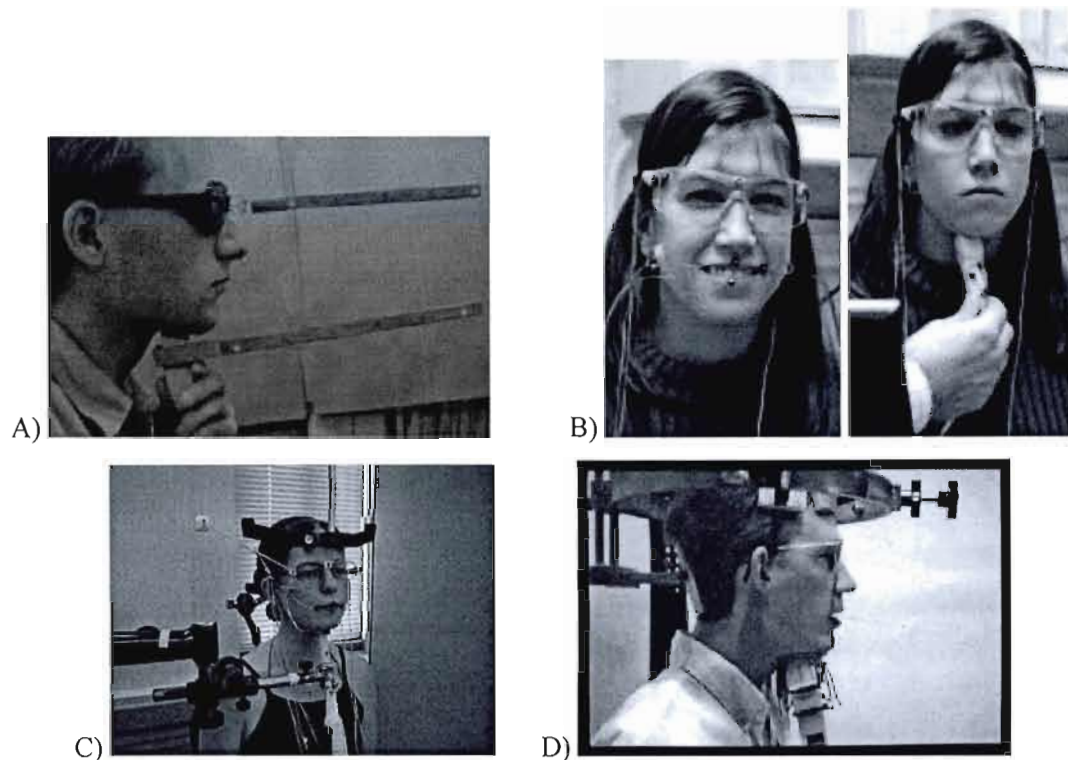


Figure 1.12 Systèmes de stabilisation ou de correction de position utilisés par différents laboratoires. A) Système Palatron, utilisé par le laboratoire APIL (Tirée de Mielke et al., 2005). B) Système HOCUS, utilisé par Haskins Laboratories (Tirée de <http://ultrafest.arizona.edu/papers/>). C) Système Optotrak/Ultrasons, utilisé à l'ISRL (Tirée de <http://ultrafest.arizona.edu/papers/>) D) Système HATS, utilisé au VTV Laboratory (tiré de Stone, 2005).

Cependant, utiliser un système contraignant peut ne pas être approprié pour l'étude de sujets enfants. C'est pourquoi il est également possible de recueillir des données relativement fiables en n'utilisant aucun système de stabilisation de la sonde ou de la tête, comme expliqué dans Gick (2002) ou Stone (2005). Dans ces cas, la tête peut être maintenue stable simplement en reposant sur un mur ou un appuie-tête.

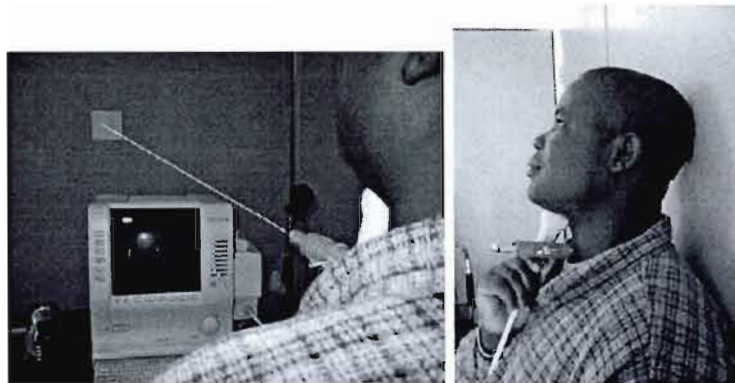


Figure 1.13 Système de pointage laser, utilisé à l'ISRL.
La sonde est maintenue par le sujet. (Tirée de Gick, 2002).



Figure 1.14 Technique main libre, utilisée au VTV Laboratory.
La sonde est maintenue par l'opératrice. (Tirée de Stone, 2005).

D'autres limites à l'utilisation de l'ultrasonographie en phonétique sont le taux d'échantillonnage et l'entrelacement des champs. Bien que la fréquence des appareils à ultrasons soit souvent de 100 hertz ou plus, le taux d'échantillonnage du signal vidéo sortant est limité par les standards analogiques actuels puisque les sorties vidéo des appareils numériques sont de type analogique. En Amérique du Nord, l'exportation du signal vidéo se fait donc à 29,97 images par seconde, tel que spécifié par le standard NTSC. Ce taux est suffisant pour étudier la parole normale ou la déglutition, mais limite cependant la diversité des études potentielles utilisant l'ultrasonographie. Le standard NTSC combinant 2 champs pour créer une image (entrelacement), il y a donc 59.94 champs par seconde. Les images sont directement affectées par cette propriété (figure 1.15) en ce sens que si le mouvement de la

langue est rapide, il se peut que chaque champ d'une même image affiche une image prise à un moment différent.

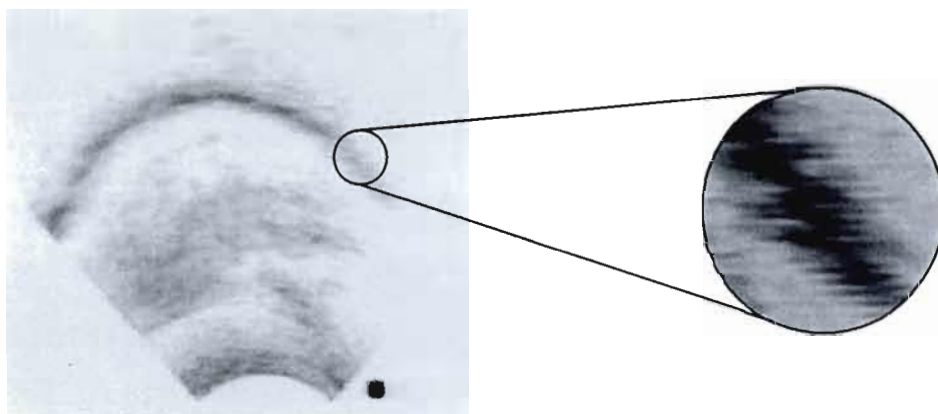


Figure 1.15 Entrelacement des deux champs constituant l'image.

Cependant, ce problème n'intervient que dans les images représentant des mouvements transitoires. Ce phénomène n'est donc pas problématique lorsque les images illustrent une position quasi-statique de la langue, comme par exemple au centre de voyelles longues prononcées isolément.

1.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer l'importance des études d'articulation compensatoire en regard des grandes théories de la perception de la parole. En modifiant les fonctions d'aires du conduit vocal, les expériences utilisant un tube labial permettent d'évaluer la nature des stratégies articulatoires élaborées et de préciser le rôle du feedback dans le processus de production de la parole. En imageant la surface de la langue, l'ultrasonographie permettra d'étudier articulatoirement les stratégies élaborées chez des locuteurs enfants, ce qui constitue une première dans ce type d'expérience.

CHAPITRE II

SIMULATIONS À L'AIDE D'UN MODÈLE ARTICULATOIRE

2.1 Introduction

Avant d'observer les conséquences de perturbations labiales sur de réels locuteurs, des simulations de stratégies compensatoires ont tout d'abord été faites à l'aide d'un modèle articulatoire. Le modèle *VLAM* (Variable Linear Articulatory Model), conçu par Shinji Maeda à partir d'un modèle adulte et intégré dans l'interface *Growth* (développée à l'Institut de la Communication Parlée), a donc été exploité pour ces simulations. Ce modèle a d'ailleurs fait l'objet d'une évaluation étendue avec les données publiées et s'est révélé fort réaliste (Ménard, 2002).

Le modèle *VLAM* permet de simuler la croissance non uniforme du conduit vocal, de la naissance jusqu'à l'âge adulte. De plus, il permet d'atteindre des cibles acoustiques à partir de configurations articulatoires initiales. Cette dernière fonctionnalité peut d'ailleurs être utilisée afin de simuler la réorganisation articulatoire nécessaire à la production de la cible ou d'une cible qui s'y approche. Le modèle est contrôlé par sept paramètres articulatoires, déterminés par l'analyse en composantes principales de Maeda (1990). Ces paramètres sont ceux illustrés à la figure 2.1 et leurs valeurs peuvent être ajustées à $\pm 3,5$ écarts types. À partir de ces paramètres, la coupe sagittale du conduit vocal est calculée et une grille semi-polaire y est superposée. Ces grilles s'ajustent aux différentes dimensions du conduit vocal en se basant sur les rapports des cavités (Goldstein, 1980). Les fonctions d'aires sont calculées à partir de ces fonctions sagittales (Heinz et Stevens, 1965) et les aires aux lèvres et les aires et lieux de constriction sont déterminés (Fant, 1960; Badin et al., 1990). Les valeurs

formantiques sont ensuite obtenues à partir de la fonction d'aire, à l'aide d'une fonction de transfert (Badin et Fant, 1984). Tous ces éléments sont intégrés dans l'interface utilisateur graphique *Growth* et à partir de laquelle les simulations ont été effectuées.

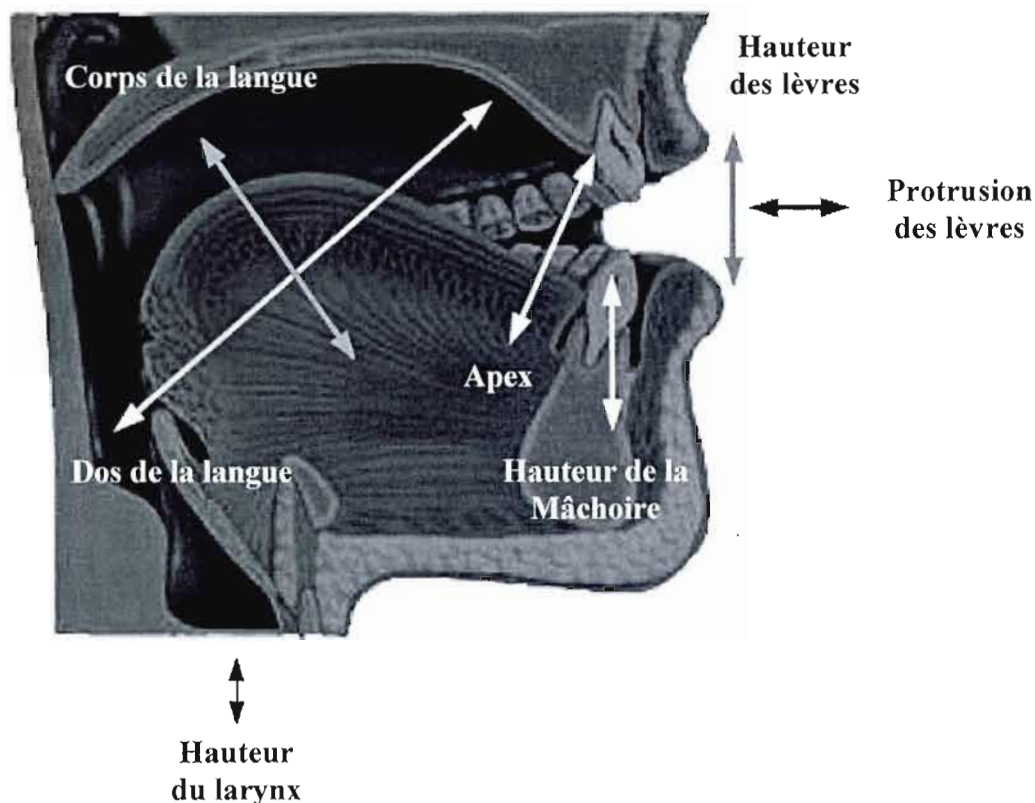


Figure 2.1 Paramètres articulatoires du modèle VLAM et degrés de liberté associés.

Les simulations faites avec ce modèle avaient pour objectif, premièrement, de s'assurer que les perturbations sélectionnées pouvaient être compensées. Elles ont également permis de déterminer, pour chaque groupe de locuteurs, les stratégies de compensation articulatoires optimales à la suite de l'introduction des perturbations et les valeurs acoustiques qui en ont résulté. Ces stratégies, traduites en positions d'articulateurs et valeurs formantiques, pourront ensuite être comparées aux stratégies réelles élaborées par les locuteurs.

2.2 Simulation des perturbations

Étant donné la nature des perturbations utilisées, c'est le paramètre *Hauteur des lèvres* qui a été manipulé, puisque ce dernier est directement relié à l'aire aux lèvres. Les perturbations ont donc été simulées en augmentant ou en diminuant la valeur de ce paramètre afin d'obtenir les aires aux lèvres associées aux diamètres des tubes labiaux utilisés. Ces simulations ont été faites sur un conduit vocal adulte et sur un conduit vocal d'enfant de 6 ans, étant donné que c'est la moyenne d'âge des sujets enfants de cette étude. Lors de ces simulations, les dimensions du conduit vocal ont été ajustées automatiquement par le modèle.

Les tailles des perturbations ont été choisies en partie en fonction des études antérieures (Savariaux et al., 1995; Ménard et al., 2004) pour faciliter les comparaisons possibles. Savariaux et al. ont déterminé la taille optimale de la perturbation à l'aide de simulations tandis que Ménard et al. se sont basés sur les données de Goldstein, pour ensuite faire des simulations articulatoires. Pour les voyelles [y] et [u], la taille des tubes pour les sujets adultes diffère de celle de Savariaux et al. (1995). En effet, le diamètre de ces tubes a été réduit de façon à ce que l'ampleur de la perturbation se rapproche de celle des enfants mais constituent tout de même une perturbation importante. Pour la perturbation de la voyelle [i], les simulations ont aidé à déterminer un diamètre de tube assez faible pour constituer une perturbation mais assez grand pour que la construction en soit facilitée et faire en sorte que le tube soit facile à tenir entre les lèvres. Aussi, pour cette voyelle, une légère augmentation de la protrusion risque d'être observée en réalité, mais cette protrusion n'a pas été simulée puisque son ampleur sera contrôlée en partie par la longueur du tube. L'objectif de ce dernier n'est pas de forcer une protrusion, et le contrôle de sa longueur permettra d'obtenir une protrusion de loin inférieure à celle lors de la production d'une voyelle arrondie. Aucune modification du paramètre *Protrusion des lèvres* n'a donc été faite lors des simulations des perturbations.

Les prototypes des voyelles à partir desquels les simulations ont été effectuées sur le conduit vocal adulte sont ceux de Ménard (2002). Ceux-ci ont été retenus puisqu'ils sont basés sur les critères acoustiques de dispersion maximale et de focalisation, en regard de la Théorie de Dispersion et de Focalisation. De plus, ces prototypes ont fait l'objet de tests de perception et

ont été publiés. Les valeurs acoustiques et paramétriques de ces prototypes sont regroupées dans le tableau 2.1, tandis que les valeurs des prototypes utilisés pour les simulations sur un conduit vocal d'enfant de 6 ans se trouvent dans le tableau 2.2. Les figures 2.2 et 2.3 illustrent les configurations du conduit vocal associées à ces prototypes.

Tableau 2.1 Prototypes utilisés pour les simulations sur un conduit vocal adulte

Voyelle	LipP	LipH	Jaw	Body	Drsm	Apex	Lx	F1	F2	F3	F4
[i]	-2.2	-0.32	-0.79	-3.06	-0.81	-1.88	0.66	247	2062	3372	3897
[y]	2.16	-0.93	-0.33	-2.42	0.39	-1.85	0.17	236	1756	2122	3410
[u]	2.7	-0.97	0.18	0.69	2.85	-1.81	-1.09	258	705	2002	3175

Tableau 2.2 Prototypes utilisés pour les simulations sur un conduit vocal de 6 ans

Voyelle	LipP	LipH	Jaw	Body	Drsm	Apex	Lx	F1	F2	F3	F4
[i]	-2.21	-0.53	-1.41	-3.24	-1.03	-1.68	-0.08	413	3306	4471	5633
[y]	2.24	-0.45	0.06	-2.18	-0.29	-1.89	-0.82	415	2897	3561	5067
[u]	2.34	-0.94	-0.47	0.52	2.45	-2.85	-1.19	433	1133	3386	4763

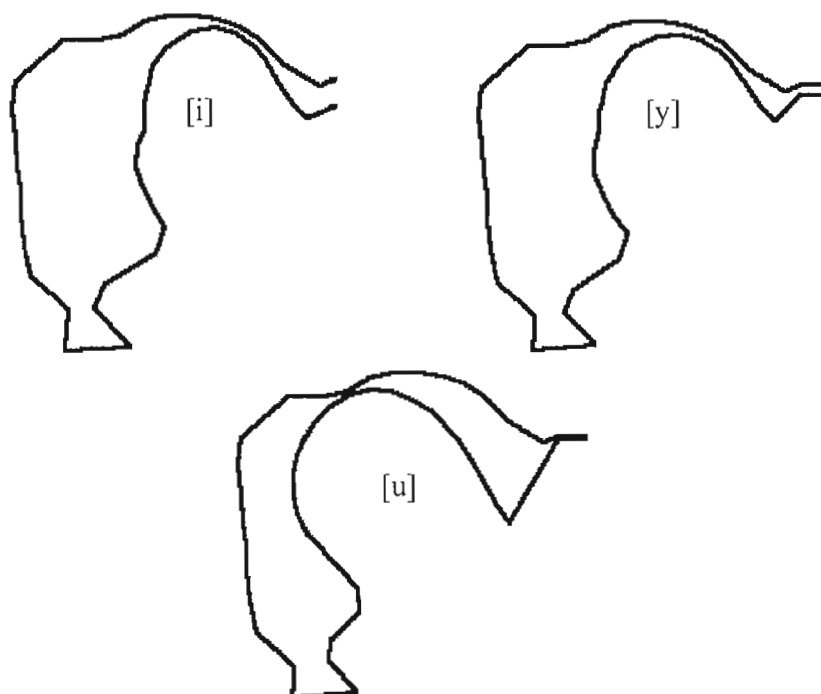


Figure 2.2 Représentations prototypiques d'un conduit vocal adulte lors de la production des voyelles [i], [y] et [u].

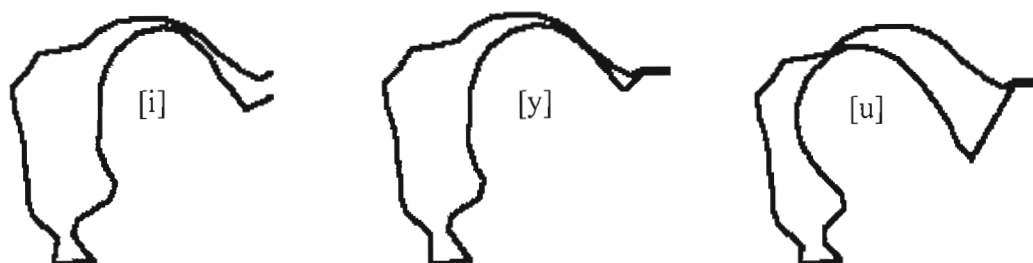


Figure 2.3 Représentations prototypiques d'un conduit vocal de 6 ans lors de la production des voyelles [i], [y] et [u].

À partir de ces prototypes, l'introduction des perturbations s'est faite en modifiant les aires aux lèvres afin que ces dernières correspondent à celles induites par les tubes utilisés pour les tests de production. Les tableaux 2.3 et 2.4 présentent les aires associées aux tubes utilisés. Les modifications d'aires aux lèvres induites par ces tubes figurent également dans ces tableaux. La longueur des tubes n'a pas été prise en compte lors des simulations puisque celle-ci a été ajustée en fonction du locuteur lors des tests de production afin de ne pas entraîner d'augmentation importante de la protrusion.

Tableau 2.3 Variations d'aires aux lèvres pour un conduit vocal de 21 ans.

Voyelle	Aire aux lèvres initiale (cm ²)	Diamètre du tube (cm)	Aire induite par la perturbation (cm ²)	Rapport des aires
[i]	1.94	0.5	0.197	-985 %
[y]	0.24	2	3.1416	1309 %
[u]	0.11	2	3.1416	2856 %

Tableau 2.4 Variations d'aires aux lèvres pour un conduit vocal de 6 ans.

Voyelle	Aire aux lèvres initiale (cm ²)	Diamètre du tube (cm)	Aire induite par la perturbation (cm ²)	Rapport des aires
[i]	1.03	0.5	0.197	-523 %
[y]	0.36	1.5	1.767	491 %
[u]	0.14	1.5	1.767	1262 %

Comme le montrent ces tableaux, c'est lors de la perturbation de la voyelle [u] que l'aire aux lèvres se voit la plus affectée, et ce autant chez l'enfant que chez l'adulte. Pour [i] et [y], le changement d'aire est plus de deux fois moins important. Cependant, cela ne signifie d'aucune façon que ces voyelles seront deux fois moins affectées sur le plan acoustique. Savariaux (1995) a montré que la voyelle [u] est une des plus sensibles à une modification de l'aire aux lèvres. Cependant, les voyelles [i] et [y] sont également grandement affectées au niveau acoustique par une telle modification. En effet, contrairement à [u] qui subit peu de

variation en ce qui a trait aux valeurs du troisième formant, les simulations montrent que pour les voyelles [i] et [y], c'est ce formant qui est le plus affecté par les perturbations. Les valeurs induites par les perturbations sont regroupées dans les tableaux 2.5 et 2.6. Les pourcentages de variation de ces valeurs formantiques occasionnés par ces perturbations par rapport aux valeurs initiales des prototypes vocaliques y figurent également. Les figures 2.4 et 2.5 représentent les distances entre ces valeurs sur les plans F1/F2 et F2/F3, pour l'adulte et l'enfant. Les origines des flèches correspondent aux valeurs avant perturbation tandis que les pointes sont associées aux valeurs issues des perturbations. La voyelle [a] est également présente dans les figures afin de mieux rendre compte des espaces vocaliques.

Tableau 2.5 Valeurs formantiques des prototypes vocaliques avant et après les simulations de perturbations (conduit vocal d'adulte).

Voyelle	Valeurs après simulation de la perturbation				Variation (Hz)				Pourcentages de variation (%)			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
[i]	227	2027	2581	3532	20	35	791	364	8.1	1.7	23.5	9.3
[y]	261	2048	3020	3444	25	292	900	34	10.6	16.6	42.4	0.1
[u]	322	1426	2011	3178	29	593	2	71	9.9	71.2	0.1	2.3

Tableau 2.6 Valeurs formantiques des prototypes vocaliques avant et après les simulations de perturbations (conduit vocal d'un enfant de 6 ans).

Voyelle	Valeurs après simulation de la perturbation				Variation (Hz)				Pourcentages de variation (%)			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
[i]	379	3082	3725	5295	34	224	746	338	8.2	6.8	16.7	6.0
[y]	445	3161	4105	5162	30	264	544	95	5.2	9.1	15.3	1.9
[u]	629	1659	3397	4731	196	526	11	32	45.3	46.4	0.3	0.7

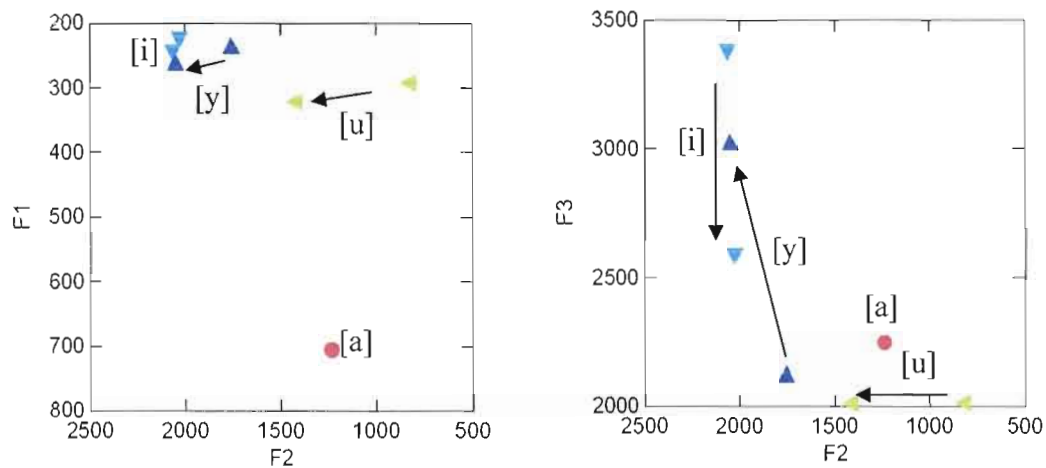


Figure 2.4 Simulation des effets des perturbations labiales pour le locuteur adulte. Les flèches montrent l'effet acoustique des perturbations sur les plans F1 vs F2 (gauche) et F2 vs F3 (droite).

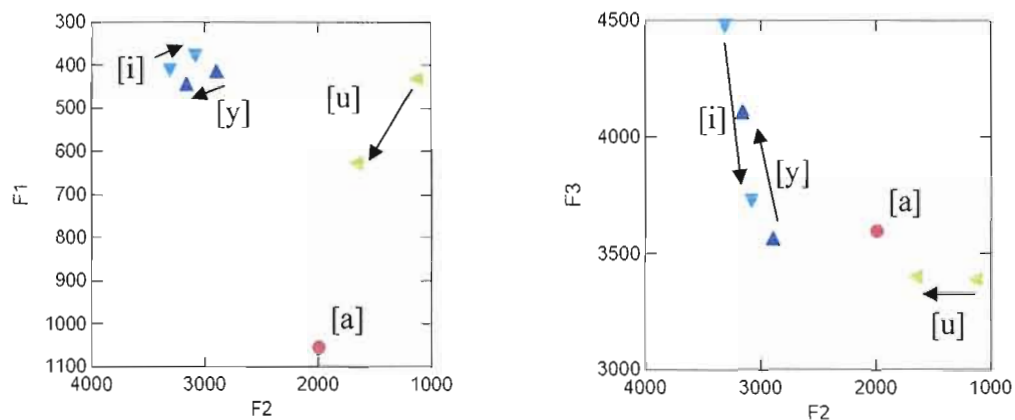


Figure 2.5 Simulation des effets des perturbations labiales pour un enfant de 6 ans. Les flèches montrent l'effet acoustique des perturbations sur les plans F1 vs F2 (gauche) et F2 vs F3 (droite).

Chez le locuteur adulte comme chez le locuteur enfant, ces simulations montrent que les voyelles [i] et [y] sont largement affectées par une modification d'aire aux lèvres. En effet, comme les tableaux 2.5 et 2.6 le laissent voir, bien que les pourcentages de variation en F3 soient inférieurs à ceux du [u] en F2, les variations en Hertz sont supérieures et considérables (791 Hz et 900 Hz pour l'adulte et 746 Hz et 544 Hz pour l'enfant). En montrant que ces perturbations affectent considérablement les voyelles à l'étude, l'utilisation de ces

perturbations se trouve donc justifiée, ce qui était l'objectif premier des simulations. Le second objectif est de vérifier si ces importants changements acoustiques résultant d'un changement d'aire aux lèvres peuvent être compensés totalement.

2.3 Évaluation des stratégies de compensation

Pour générer les stratégies de compensation, la fonction d'atteinte de cible acoustique du modèle *VLAM* a été utilisée. Pour ce faire, le paramètre *Hauteur des lèvres* des configurations articulatoires perturbées a été bloqué afin que ce dernier ne puisse pas servir au modèle dans l'élaboration de la stratégie de compensation. Le modèle a ensuite tenté d'atteindre les valeurs acoustiques des voyelles avant perturbation à l'aide une méthode d'inversion itérative exploitant une matrice Jacobienne de la fonction reliant les paramètres articulatoires aux valeurs formantiques (Jordan et Rumelhart, 1992). À partir des valeurs d'origine, le programme peut donc calculer les effets acoustiques de petites variations pour s'approcher petit à petit, après plusieurs essais, de la cible spécifiée. La configuration articulatoire reliée aux paramètres se rapprochant le plus de la cible acoustique est finalement affichée. Les configurations atypiques du conduit vocal ainsi obtenues constituent donc les stratégies de compensation optimales et sont présentées dans les figures 2.6 à 2.11 ci-dessous, où sont illustrées, pour chaque voyelle, la configuration articulatoire initiale (avant la simulation de la perturbation) et la configuration du conduit vocal une fois la compensation effectuée.

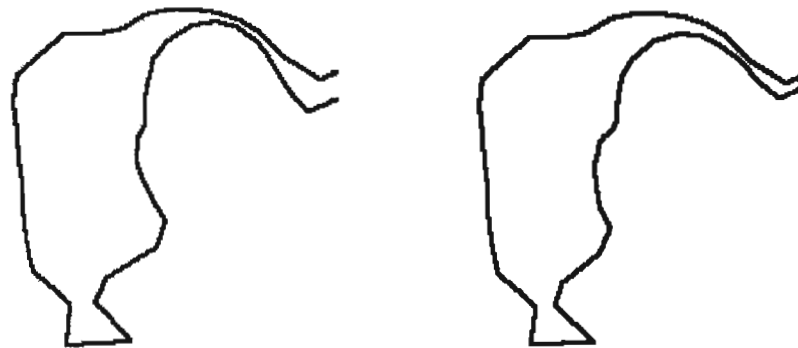


Figure 2.6 Configurations articulatoires de la voyelle [i] avant perturbation (gauche) et après compensation (droite), pour un conduit vocal adulte.

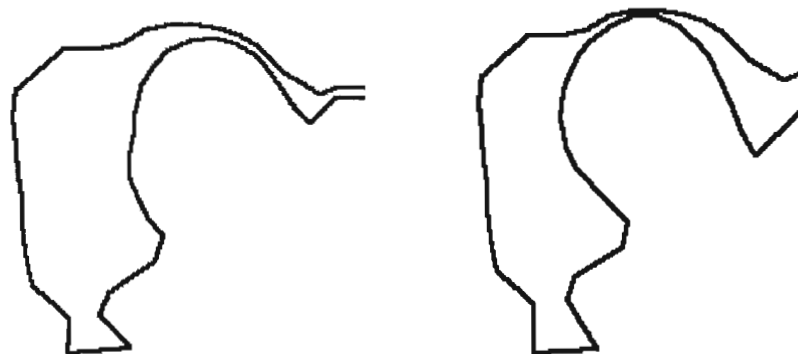


Figure 2.7 Configurations articulatoires de la voyelle [y] avant perturbation (gauche) et après compensation (droite), pour un conduit vocal adulte.

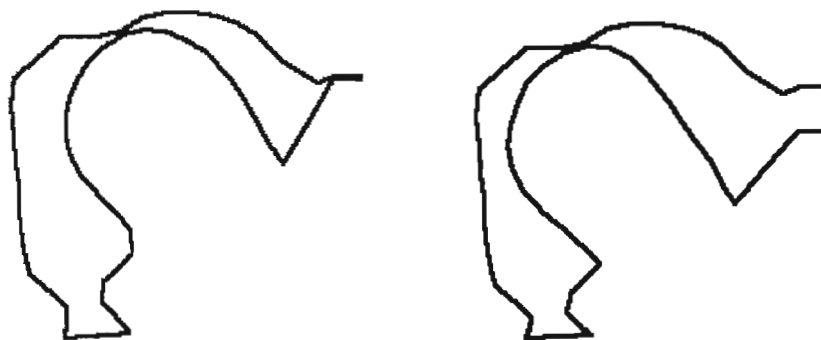


Figure 2.8 Configurations articulatoires de la voyelle [u] avant perturbation (gauche) et après compensation (droite), pour un conduit vocal adulte.



Figure 2.9 Configurations articulatoires de la voyelle [i] avant perturbation (gauche) et après compensation (droite), pour un conduit vocal de 6 ans.



Figure 2.10 Configurations articulatoires de la voyelle [y] avant perturbation (gauche) et après compensation (droite), pour un conduit vocal de 6 ans.



Figure 2.11 Configurations articulatoires de la voyelle [u] avant perturbation (gauche) et après compensation (droite), pour un conduit vocal de 6 ans.

Les valeurs acoustiques une fois les stratégies compensatoires effectuées sont présentées dans les tableaux 2.7 et 2.8. S'y trouvent également les différences par rapport aux valeurs initiales des prototypes vocaliques, en Hertz et en pourcentage.

Tableau 2.7 Valeurs acoustiques une fois les compensations effectuées, et variation de ces valeurs par rapport aux valeurs prototypiques initiales (conduit vocal adulte)

Voyelle	Valeurs après simulation de la perturbation				Variation (Hz)				Pourcentages de variation (%)			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
[i]	243	2060	3317	4139	4	2	55	389	1.6	0.1	1.6	8.6
[y]	241	1805	2134	3551	5	49	12	141	2.1	2.8	0.6	4.1
[u]	268	748	2010	3598	10	43	8	423	3.9	6.1	0.4	13.3

Tableau 2.8 Valeurs acoustiques une fois les compensations effectuées, et variation de ces valeurs par rapport aux valeurs prototypiques initiales (conduit vocal de 6 ans)

Voyelle	Valeurs après simulation de la perturbation				Variation (Hz)				Pourcentages de variation (%)			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
[i]	416	3276	4427	5395	3	30	44	302	0.7	0.9	1.0	5.4
[y]	399	2885	3555	5624	16	12	6	557	3.9	1.4	0.2	11.0
[u]	448	1154	3381	4702	15	21	5	61	3.5	1.9	0.1	1.3

Les valeurs présentes dans ces tableaux confirment l'efficacité des compensations effectuées. En effet, les valeurs pour les trois premiers formants ne diffèrent que d'un maximum de 55 Hertz pour l'adulte et 44 Hertz pour l'enfant. Cependant, des variations de plusieurs centaines de Hertz sont observées en F4, autant chez l'enfant que chez l'adulte. Toutefois, ces valeurs ne représentent que des variations d'environ 13% par rapport aux valeurs prototypiques initiales et ne sont pas assez importantes pour diminuer de façon significative la qualité des compensations faites.

Du point de vue articulatoire, plusieurs similitudes et quelques différences entre les conduits vocaux d'adulte et ceux de l'enfant peuvent être observées dans ces figures. Pour la voyelle [i] (figures 2.6 et 2.9), une réorganisation articulatoire semblable est constatée, c'est-à-dire un avancement du corps de la langue et une montée de l'apex afin d'augmenter la constriction faite au palais et d'avancer le lieu de celle-ci. Cela a un effet direct sur les rapports entre les dimensions des cavités avant et arrière et diminue par conséquent l'effet de la protrusion, en diminuant la longueur de la cavité avant pour ainsi augmenter la valeur du formant affilié à celle-ci (F3). Chez l'enfant, une légère remontée du larynx est également observée, contrairement à une position relativement similaire chez l'adulte. Cela est peut-être fait pour diminuer la longueur de la cavité arrière afin d'augmenter la valeur de F2 puisque les simulations ont montré que pour cette perturbation, le deuxième formant était plus affecté chez l'enfant que chez l'adulte. En ce qui a trait à la voyelle [y] (figures 2.7 et 2.10), la stratégie adoptée est encore semblable chez l'adulte et chez l'enfant et consiste en un recul de la langue et un abaissement du larynx. La valeur du formant affilié à la cavité arrière (F3) se verrait donc diminuée par cet abaissement. Finalement, pour produire la voyelle [u] en condition de perturbation, les figures 2.8 et 2.11 montrent que la stratégie articulatoire la plus efficace chez l'enfant et chez l'adulte est le recul de la langue pour passer d'une constriction vélaire à une constriction vélopharyngale, entraînant ainsi une baisse de la valeur de F2. Le type de résonance ayant maintenant changé en tube ouvert-fermé pour la cavité avant, l'allongement de cette cavité entraîne donc forcément une baisse du formant affilié, en l'occurrence F2. Il est par ailleurs possible qu'avec les modifications faites aux configurations du conduit vocal et la morphologie du conduit vocal de l'enfant, des changements d'affiliations surviennent. Les affiliations formants-cavités typiques risquent peut-être de ne pas être celles retrouvées en condition de perturbation, affectant par le fait même des changements supplémentaires aux valeurs formantiques.

2.4 Conclusion

Ces simulations à l'aide du modèle VLAM ont permis de vérifier que non seulement ces perturbations étaient considérables, mais aussi que malgré leur ampleur, il est possible d'élaborer des stratégies de compensation des plus efficaces. Les compensations faites par le

modèle se sont avérées aussi complètes chez les adultes que chez les enfants. Cependant, bien que les stratégies de compensation pour les mêmes voyelles se ressemblent dans les deux groupes, il est possible que les changements dans les affiliations formants-cavités soient plus nombreux chez l'enfant, étant donné les configurations atypiques du conduit vocal adoptées et les facteurs physiologiques reliés à la croissance non uniforme du conduit vocal.

CHAPITRE III

ÉTUDE DES COMPENSATIONS ACOUSTIQUES ET ARTICULATOIRES EN PAROLE PERTURBÉE

À la suite des simulations effectuées, des tests de production ont été menés. Les analyses acoustiques et articulatoires des résultats de ces tests permettront de préciser les caractéristiques des compensations et de dégager les principales stratégies articulatoires adoptées pour les réaliser. Sur le plan acoustique, la dimension temporelle sera étudiée afin de déterminer si les compensations faites sont immédiates ou non. L'efficacité des stratégies compensatoires sera jugée en se basant sur les valeurs formantiques pour indiquer la nature complète ou incomplète des compensations. L'analyse des données articulatoires, quant à elle, fera ressortir les principales stratégies articulatoires adoptées, en termes de positions de la langue. Ces résultats permettront de préciser si, en se basant sur les valeurs issues de ces tests de production seulement, les individus sont capables d'élaborer des stratégies articulatoires efficaces pour compenser les effets d'une modification d'aire aux lèvres.

3.1 Méthodologie

3.1.1 Sujets

Deux groupes d'individus ont participé à ces tests de perturbation de la parole. Le premier était constitué de 4 enfants, deux garçons (5 ans et 6 ans) et deux filles (6 ans et 7 ans). Le deuxième groupe comptait 4 adultes, 1 homme et 3 femmes, âgés respectivement de 21, 24, 28 et 29 ans. Pour faciliter l'identification des sujets, la référence au groupe d'appartenance

sera faite pour chacun d'eux en ajoutant _e ou _a à la suite du code identifiant chaque sujet, afin de préciser si celui-ci est un enfant ou un adulte. Les sujets adultes connaissaient l'objectif de l'expérience mais ne possédaient pas de connaissances suffisantes des relations articulatoire-acoustiques pour pouvoir anticiper les stratégies articulatoires à élaborer. Les sujets ont été recrutés via des contacts personnels et les enregistrements se sont déroulés en partie au *Motor Control Lab* de l'Université McGill et en partie au *Laboratoire de phonétique* de l'UQAM. Tous les sujets adultes et trois des quatre sujets enfants ont été enregistrés à l'Université McGill en raison du type d'enregistrement effectué (ultrasonographie combiné au système *Optotrak*). Le sujet BP_e a été enregistré à l'UQAM puisque seules des données d'ultrasonographie ont été recueillies pour ce sujet. Chaque enfant a reçu une peluche et des friandises pour sa participation et une compensation de 20\$ a été donnée aux adultes. Les coûts de transport pour se rendre aux lieux d'enregistrement ont également été défrayés. Aucun sujet n'avait de problème d'audition ou de problème d'ordre phonologique.

3.1.2 Stimuli

Un sous-ensemble de la totalité du corpus enregistré (la totalité du corpus comprenait les voyelles [a], [ɛ], [o], [i], [y] et [u], avec tube labial et/ou plaque occlusale) a été sélectionné et les voyelles cardinales du français [a],[i],[y] et [u] sont les stimuli retenus pour la présente étude. Afin de limiter l'étendue de cette recherche, le choix a été fait de n'étudier que les compensations faites avec un tube labial. La validation des voyelles retenues comme candidats pour étudier l'articulation compensatoire avec le type de perturbation utilisé dans cette étude a d'ailleurs été faite au chapitre précédent. La première de ces voyelles ([a]) n'a été choisie que pour servir de référence lors de la caractérisation des formes de la langue et ne sera donc étudiée qu'articulatoirement et qu'en condition normale. Chacun des autres stimuli a été répété 10 fois dans les conditions suivantes : normale préperturbation, perturbée, normale postperturbation. L'ordre des stimuli était aléatoire mais ceux-ci étaient toujours produits en suivant l'ordre des ces conditions. Le fait d'ajouter une condition normale à la suite de la condition de perturbation permet de vérifier s'il y a présence d'effet d'habituation.

De plus, le nombre de répétitions (10) choisi assure une bonne fiabilité statistique et ce, même si quelques répétitions sont susceptibles d'être éliminées pour diverses raisons.

Chaque voyelle a été associée à une marionnette et les sujets devaient prononcer le nom de la marionnette à chaque apparition de celle-ci. Les mouvements et apparitions de ces marionnettes étaient contrôlés par un expérimentateur et étaient sujets à de multiples variations. Cela avait pour effet d'empêcher une position statique des articulateurs tout au long des 10 répétitions et de maintenir l'attention que les sujets portaient à la tâche. Cependant, les apparitions de ces marionnettes se faisaient dans une même zone, directement devant les sujets, afin d'éviter que ceux-ci aient à bouger la tête.

3.1.3 Instrumentation

Les récentes recherches faites avec un tube labial (Savariaux et al. 1995, 1999; Cocusse, 1996; Ménard et al., 2004) ont toujours utilisé un tube labial qui augmentait l'aire aux lèvres lors de la production d'une même voyelle arrondie, [u]. Les tubes labiaux utilisés dans la présente étude serviront, premièrement, à augmenter l'aire aux lèvres lors de la production non seulement de la voyelle arrondie [u], mais aussi de la voyelle [y], et deuxièmement à diminuer l'aire aux lèvres lors de la production de [i], forçant ainsi la production d'un [i] arrondi.

Les tubes labiaux ont été construits en superposant plusieurs couches de feuilles d'acétate, formant ainsi un tube rigide pouvant difficilement se déformer et dont on peut contrôler précisément le diamètre. Pour ce faire, des tubes labiaux ayant des diamètres de 0,5 cm et de 1,5 cm ont été utilisés pour les enfants tandis que des tubes de 0,5 cm et de 2 cm de diamètre ont servi de perturbateurs pour les adultes. La figure 3.1 permet de voir le modèle de tube utilisé tandis que le tableau 3.1 décrit les tubes utilisés pour chaque voyelle pour chaque groupe de sujet. L'objectif du tube labial n'étant pas d'augmenter la protrusion des lèvres, différentes longueurs de tubes (variant de 1 cm à 2 cm) ont été utilisées afin de s'adapter aux lèvres plus minces ou plus épaisses des locuteurs. Le choix de ces longueurs a été guidé par les longueurs de tube utilisées par Ménard et al. (2004), qui s'était basée sur les données de

Goldstein (1980). Bien que seule l'augmentation de l'aire aux lèvres soit la conséquence désirée, l'insertion d'un tube labial entre les lèvres du locuteur a également pour effet, dans quelques cas, d'entraîner une légère augmentation de la protrusion, puisque le locuteur doit utiliser ses lèvres de façon à entourer complètement le tube afin que ce dernier ne puisse pas tomber et qu'il n'y ait pas d'écoulement d'air autour du tube.



Figure 3.1 Type de tube utilisé comme perturbation labiale. Vue en plongée(gauche) et de haut (droite).

Tableau 3.1 Tubes utilisés en fonction des voyelles et des locuteurs

Groupe	Voyelle	Diamètre du tube (cm)*	Aire aux lèvres induite par le tube (cm ²)
Adultes	i	0,5	0,1964
	y	2	3,1416
	u	2	3,1416
Enfants	i	0,5	0,1964
	y	1,5	1,7672
	u	1,5	1,7672

* Se référer au chapitre II pour les justifications de ces données.

Le système à ultrasons utilisé a été le *Sonosite 180 Plus*. La sonde de cet appareil permet de visualiser un angle de 84 degrés. Pour les sujets adultes et deux des enfants (les deux sujets féminins), la sonde était placée sur un pied de microphone afin de la stabiliser. Pour les deux autres sujets enfants, la sonde était tenue en main sous le menton du sujet par une expérimentatrice, la main de l'expérimentatrice appuyée sur le thorax de l'enfant. La sonde était donc maintenue immobile. La tête des sujets reposait sur un appui-tête. La stabilisation à la fois de la tête et de la sonde est un élément primordial puisque aucun système de correction de position n'a ensuite été utilisé. Le signal sonore a été capté par un microphone unidirectionnel à condensateur *Shure SM-84*, placé à 30 cm de la bouche des sujets. Le signal vidéo a été enregistré au format NTSC par un caméscope numérique Panasonic AG-DVC 30. C'est également cet appareil qui a enregistré le signal audio, à une fréquence de 48 kHz.

3.1.4 Analyse des données acoustiques

Pour les données acoustiques, chaque voyelle a été extraite au format *wav* et les signaux ont été étiquetés avec le logiciel Praat 4.3.0.4. Les éléments suivants (figure 3.2) relatifs à chaque voyelle ont été extraits à l'aide de scripts :

- identification de la voyelle dans l'ordre des séquences (Id);
- temps correspondant à la première impulsion glottique* de la voyelle (T_1);
- temps correspondant au milieu de la voyelle (T_2);
- image de l'appareil à ultrasons correspondant au milieu de la voyelle (US);
- F0, F1, F2, F3 et F4 à la première vibration périodique et au milieu de la voyelle;

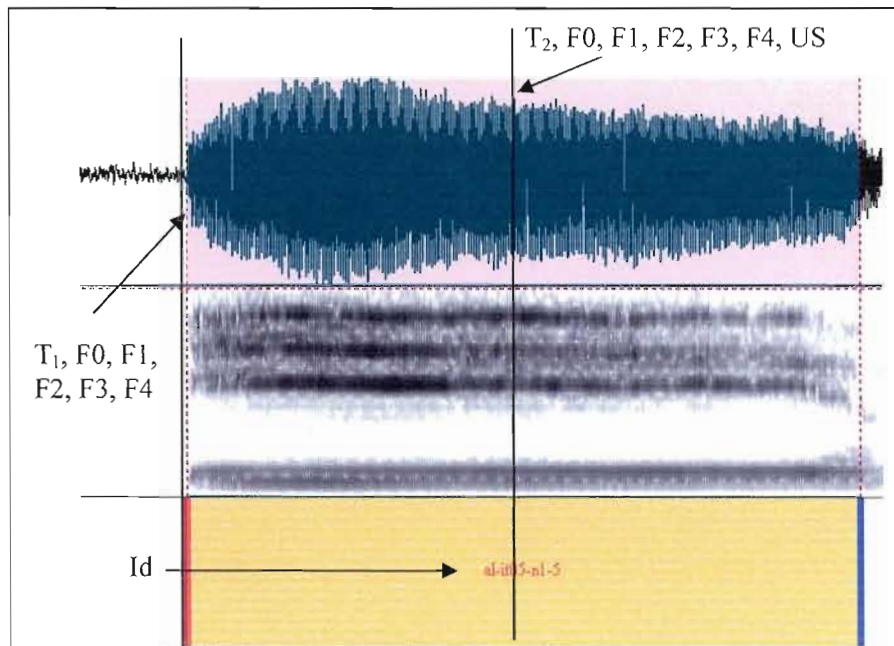


Figure 3.2. Éléments analysés sur le signal acoustique de chaque voyelle.

* C'est la première impulsion glottique *périodique* qui a ici été notée. Cette solution permet un traitement uniforme des données de tous les locuteurs, puisqu'au début de plusieurs voyelles produites par certains locuteurs, on retrouvait un coup de glotte. La figure 3.3 illustre un de ces cas.

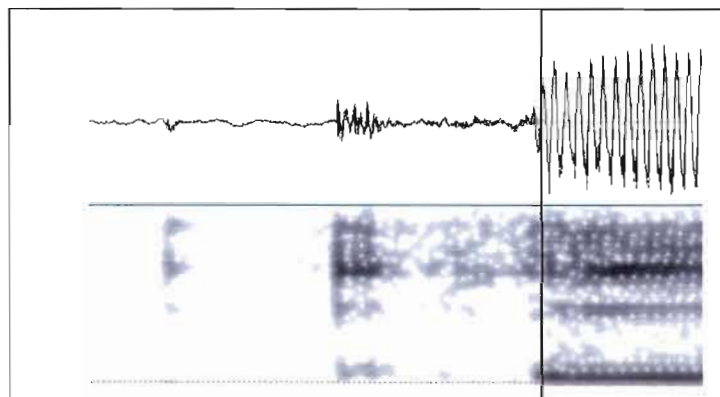


Figure 3.3 Début de voyelle apériodique. La première pulsation périodique est identifiée par la ligne verticale.

Afin d'être non seulement constant mais également précis, l'étiquetage du moment de la première impulsion glottique s'est fait au premier passage par zéro de la première période de l'onde (figure 3.4).

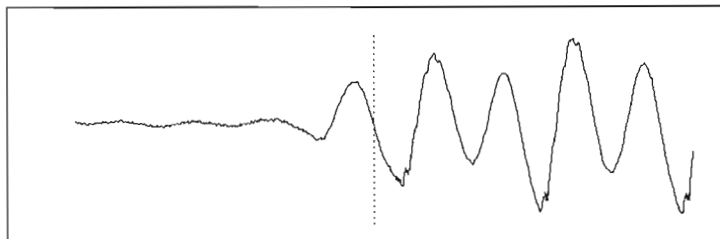


Figure 3.4 Premier passage par zéro de la première vibration périodique.

Les mesures des quatre premiers formants ont été faites à l'aide d'une analyse LPC (algorithme *burg*) qui a détecté jusqu'à 5 formants, nombre nécessaire à la bonne détection automatique des formants de la voyelle [u]. Pour faire cette analyse formantique, le programme a rééchantillonné le signal à une fréquence correspondant au double de la valeur du formant maximal spécifiée, cette dernière variant de 5500 Hz à 6500 Hz en fonction du locuteur, résultant en un taux d'échantillonnage de 11 KHz à 13 KHz. Suite à ce rééchantillonnage, une pré-emphase est faite et une fenêtre d'analyse de type Gaussienne est appliquée pour calculer les coefficients LPC à l'aide de l'algorithme *Burg*. La largeur de cette fenêtre a été ajustée à 0,005 s. afin de faire une détection optimale des valeurs lors de la première vibration périodique. Les valeurs ont donc été mesurées automatiquement à toutes les 0,00125 s. Chaque valeur détectée automatiquement par le programme a été validée visuellement à l'aide des spectrogrammes. Pour la fréquence fondamentale, les valeurs ont été extraites par une analyse de la période acoustique basée sur la méthode d'autocorrélation. Ces données ont ensuite été traitées par un programme Matlab (MathWorks) qui a permis, pour chaque voyelle, de visualiser facilement les évolutions temporelles de chaque formant (en Hertz), les distances inter-formants (en Bark), les ellipses de dispersions en F1 vs F2 et F2 vs F3, pour chaque condition normale et perturbée. Les distances inter-formants qui ont été choisies ont été celles représentant le caractère focal (Schwartz et al., 1997) des voyelles étudiées c'est-à-dire : F4-F3 pour [i], F3-F2 pour [y] et F2-F1 pour [u].

La dispersion des voyelles pour une même condition a été calculée en faisant la moyenne des distances euclidiennes entre chaque voyelle et la valeur moyenne des voyelles. Des analyses statistiques de type ANOVA et des tests de Student seront faits sur ces données, ce qui permettra d'évaluer le caractère \pm complet des compensations. Cependant, ces analyses seront faites sur l'ensemble des 10 répétitions, ce qui ne permettra pas de déceler les cas où seulement une ou deux répétitions représentent des compensations complètes. C'est plutôt un critère perceptif basé sur la qualité de la voyelle (voir chapitre IV) qui permettra de déterminer la qualité de la compensation pour chaque voyelle prononcée en condition perturbée.

3.1.5 Analyse des données articulatoires

En ce qui a trait aux données articulatoires, les images correspondant aux centres des voyelles ont été extraites à l'aide du logiciel Adobe Premiere Pro version 1. Les tracés des contours de la langue ont été faits semi-automatiquement à l'aide du logiciel Edgetrak (University of Delaware) pour chaque image. Ce logiciel est celui qui a été retenu, compte tenu du fait qu'après avoir fait le tracé de la surface de la langue automatiquement, celui-ci permet à l'utilisateur de faire n'importe quelle correction manuelle. L'utilisation d'un programme qui permet ce type de correction est primordiale, étant donné que l'affichage obtenu par l'imagerie par ultrasonographie comporte quelques défauts. En effet, il arrive de voir apparaître sur certaines images des zones floues, des dédoublements ou des artefacts (figure 3.5). Les cas de dédoublement de contours sont ceux qui causent le plus de problèmes puisqu'il faut alors aller chercher les images voisines de la même séquence pour déterminer quel contour représente la surface réelle de la langue. Quant aux artefacts, ils peuvent être distingués par le fait qu'ils n'apparaissent pas sur toutes les images, faisant en sorte que l'analyste averti sait qu'il s'agit d'artefact et non du palais ou de la surface de la langue. Malgré ces quelques inconvénients, aucune séquence n'a été rejetée et les problèmes liés aux quelques images qui comportaient des dédoublements ont été réglés à la suite de l'examen des images attenantes.

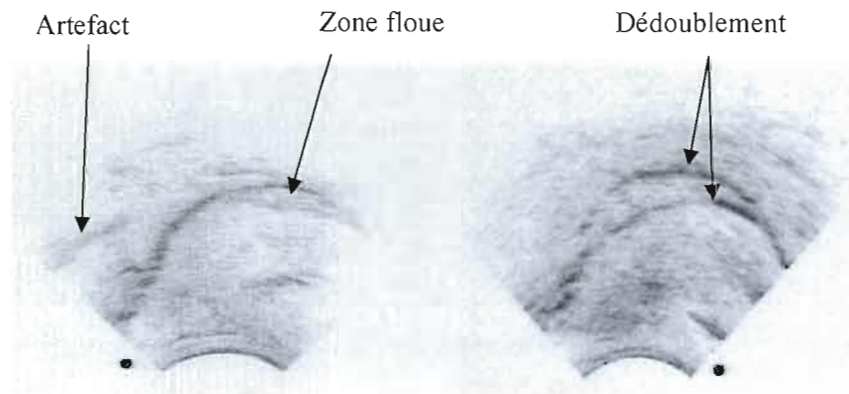


Figure 3.5 Quelques problèmes liés à l’affichage des images d’ultrasonographie.

Une fois les surfaces de la langue tracées, il faut trouver une méthode d’analyse appropriée pour les traiter. Dans les paragraphes qui suivent, un survol des méthodes existantes sera tout d’abord fait en expliquant les raisons pour lesquelles elles n’ont pas été retenues. Ensuite, une nouvelle méthode d’analyse sera présentée et justifiée à l’aide des données de la présente étude.

Lorsqu’il s’agit d’analyser la position de la langue, plusieurs techniques peuvent être adoptées. Une des méthodes qui est utilisée depuis longtemps est de relever les coordonnées du point le plus élevé de la langue, comme l’a fait Fant (1960). Comme le montre la figure 3.6, cette méthode a l’avantage de résulter en de bonnes corrélations articulatoire-acoustiques.

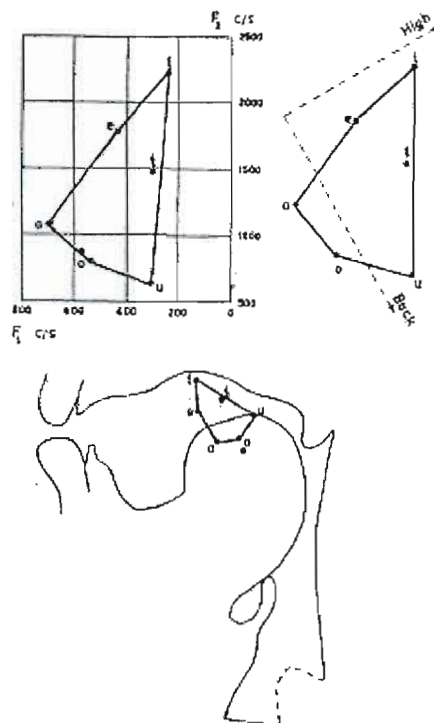


Figure 3.6 Caractérisation de la langue à l'aide de son point le plus élevé et mise en évidence des ressemblances sur le plan acoustique. (Tirée de Fant (1960)).

Pour utiliser cette technique comme elle l'a été utilisée auparavant, il faut que les images de la langue soient alignées sur le plan occlusal, c'est-à-dire qu'elles soient parallèles au plancher de la bouche. Ce n'est pas le cas dans la présente étude, puisque pour visualiser le maximum du contour de la langue avec l'ultrasonographie, il faut que la sonde soit placée à un certain angle par rapport à la verticale, comme le montre la figure 3.7. Le plan de référence de la sonde est donc différent de celui du sujet, puisque l'image obtenue n'est pas alignée sur le plan occlusal du sujet. Bien que le point le plus élevé de la langue soit relié à sa position, il est intéressant de se demander jusqu'à quel point la position d'un seul point de la langue peut nous renseigner sur sa forme. Pour rendre compte des différences entre les formes de langue atypiques (ou *supershapes*, selon Lindblom, 1971) susceptibles d'être retrouvées dans les données de cette étude, il est nécessaire d'avoir le maximum

d'information sur la forme de la surface de la langue. Cette méthode où un seul point est utilisé pour décrire à la fois la *forme* et la *position* ne semble pas suffisante, puisqu'elle ne donne pas assez d'information. Cependant, son principe sera ici retenu, étant donné les corrélations articulatoire-acoustiques possibles qu'une telle méthode permet d'obtenir.

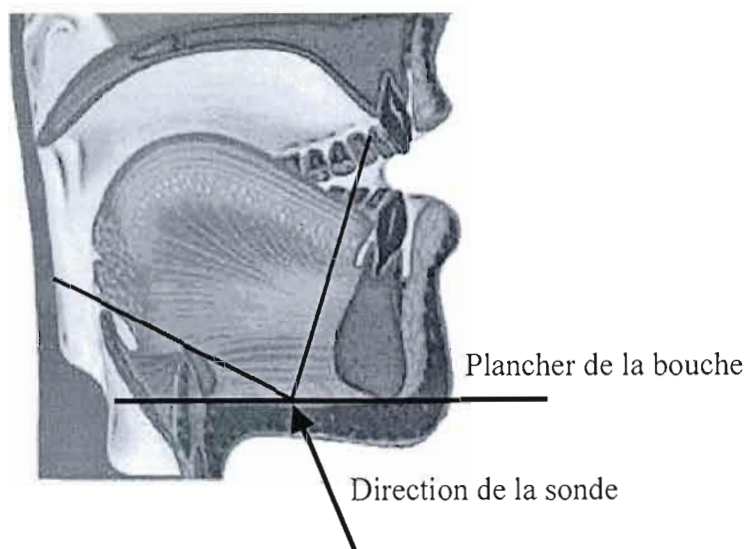


Figure 3.7 Direction de la sonde par rapport au plan occlusal. Noter que la direction de la sonde n'est pas perpendiculaire au plancher de la bouche.

L'analyse en composantes principales ou PCA (Principal Components Analysis) est une autre technique utilisée pour faire une analyse quantitative de la langue. C'est d'ailleurs de cette analyse que s'est servi Maeda (1990) pour élaborer le modèle VLAM, présenté au chapitre II. Cette technique a été utilisée, entre autres, par Harshman et al. (1977), Maeda (1990) et plus récemment par Lindblom et Sussman (2002). La PCA permet d'expliquer un maximum de la variance à l'aide d'un petit nombre de facteurs (2 pour Harshmal et al. (*high-front et low-back*, *high-back et low-front*), 2 pour Lindblom et Sussman (*horizontal*, *vertical*) et 3 pour Maeda (*apex*, *dorsum*, *body*)). Bien que cette technique soit en général appliquée à des cinéradiographies, il est possible de croire qu'elle pourrait être applicable à des images d'ultrasonographie. Cependant, il ne faut pas oublier que les ultrasons ne nous permettent pas de voir l'apex de la langue, ce qui fait que des composantes telles que celles de Maeda (1990)

ne pourraient pas être ici appliquées. Quant à l'analyse faite par Lindblom et Sussman (2002), leurs facteurs ne semblent pas en mesure de fournir une dispersion efficace à l'intérieur de l'espace articulatoire, tel que montré par la Figure 3.8.

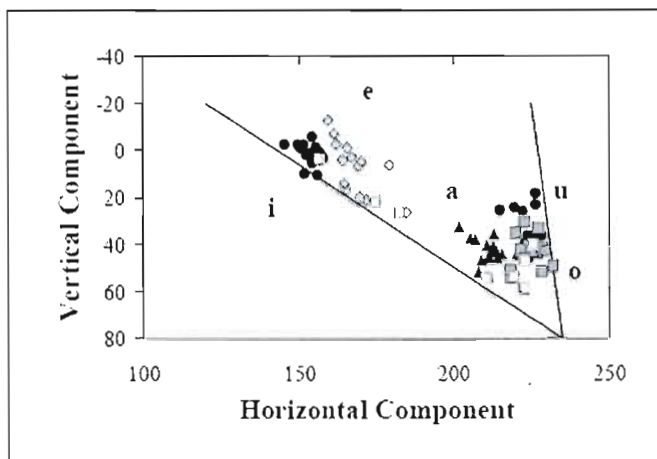


Figure 3.8 Résultat de l'Analyse par composantes principales de Lindblom et Sussman (2002).

Le critère de dispersion est important dans la présente étude, où il sera nécessaire de distinguer plusieurs formes différentes pour une même voyelle. Or, l'analyse faite par Lindblom et Sussman (2002) montre que l'écart entre /a/, /u/ et /o/ est très mince et que cette analyse n'a peut-être pas le pouvoir discriminant nécessaire et désiré pour la présente étude. Aussi, la dispersion des données se fait selon une certaine linéarité, faisant en sorte que l'espace articulatoire du locuteur semble assez limité.

Finalement, les facteurs *high-front low-back* et *high-back, front-low* obtenus par Harshman et al. (1977) semblent être applicables et ont été validés pour d'autres langues, telles que l'allemand (Hoole, 1998) et l'islandais (Nix et al, 1996), et à partir de données issues d'autres types d'imagerie (EMMA (Hoole, 1999) et IRM (Hoole et al., 2000)). L'analyse de Harshman et al., appelée PARAFAC_a, peut même être utilisée afin de caractériser des formes de langue en 3 dimensions (Zeng et Hasegawa-Johnson, 2003) et confirme donc que 2 composantes sont suffisantes pour décrire la position de la langue lors de la production des voyelles. Bien qu'offrant de bons résultats, cette technique ne sera pas utilisée pour la

raison de l'orientation des images issues de l'ultrasonographie, comme expliqué précédemment.

Une dernière technique a été développée dernièrement par Iskarous (2005) afin de trouver des patrons de déplacements typiques lors des mouvements de la langue. Même si l'étude dynamique des configurations de la langue n'est pas l'objet de ce mémoire, il est tout de même intéressant d'aborder cette technique puisqu'elle suggère que l'évolution dynamique de la langue est gouvernée par certains facteurs précis. Ainsi, lors de ces déplacements, la langue obéirait à deux patrons dynamiques : l'*arc* et le *pivot*. L'*arc* représente la courbure maximale de la langue et le *pivot* est un point sur lequel s'effectue le mouvement transitoire. Pour les mouvements pivotés, la tâche serait de contrôler deux zones du conduit vocal, tandis que pour les cas arqués, seulement une région serait impliquée dans la réalisation de la tâche. Cette approche jette un regard nouveau sur les configurations linguales servant de cibles définissant la tâche du locuteur, qui n'ont longtemps été étudiées qu'en positions statiques.

Après avoir vu que les méthodes existantes ne peuvent pas s'appliquer à la présente étude ou alors ne sont pas suffisantes, une technique novatrice a été élaborée. L'objectif partiel de ce mémoire était de développer une méthode d'analyse quantitative pouvant servir à analyser des contours de sujets enfants (qui sont plus variables par nature) et capable de rendre compte à la fois de la forme *et* de la position de la langue.

Pour ce faire, un programme Matlab développé au Laboratoire de phonétique de l'UQAM, *Lingua*, a été utilisé. Ce programme prend en charge les contours issus d'*Edgetrak* et ramène la forme d'un contour à un triangle en se basant sur les points A, B et C (figure 3.9).

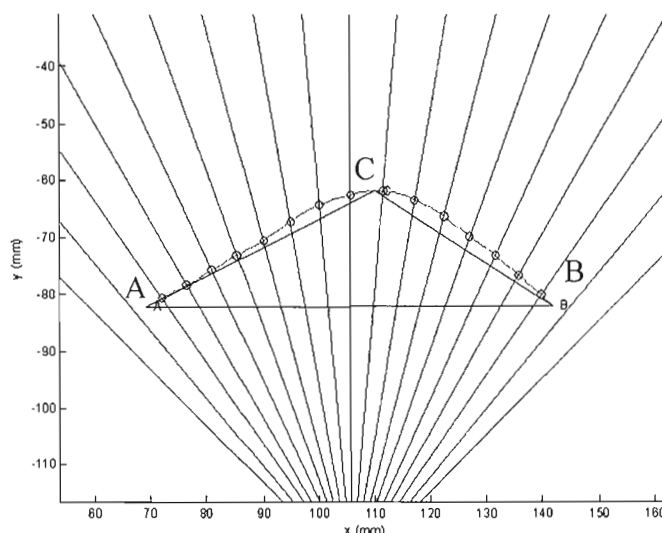


Figure 3.9 Formation du triangle faite par Lingua à l'aide des points A, B et C.

Différents triangles peuvent donc être obtenus et les voyelles [a], [i] et [u] peuvent être caractérisées à l'aide de ces triangles et des points A, B, C, D et E (figure 3.10). AB est la droite formée en reliant les extrémités du contour, tandis que CD est la droite partant perpendiculairement du point le plus éloigné de la droite AB pour rejoindre cette dernière. Le point E, quant à lui, est le point maximal en hauteur du contour. Le programme calcule également les distances AC, CB, AD et DB et tous les angles formés par ces droites, en plus de la pente de la droite AB.

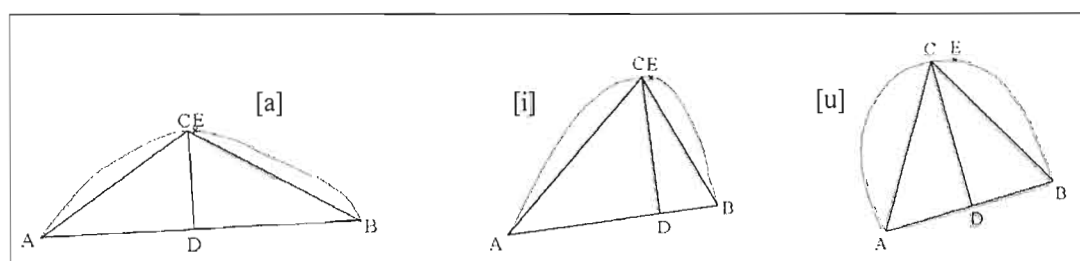


Figure 3.10 Types de triangles obtenus pour les voyelles [a], [i] et [u], à partir de contours réels.

À partir de ces éléments, certains facteurs ont été retenus afin de caractériser, tout d'abord la position, et ensuite la forme de la langue. En s'inspirant de Fant (1960), le point maximal (E)

a été retenu comme meilleur indice traduisant la position de la langue. Il faut préciser ici que ce point n'est pas le point le plus élevé par rapport au plancher de la bouche, mais bien le point le plus éloigné de la sonde de l'appareil à ultrasons. Des analyses discriminantes sur les données d'adultes en condition normale préperturbation ont révélé que ce point permettait des pourcentages de classifications correctes pour [a], [i/y] et [u] respectivement de 100 %, 97,5 % et 100 %. Ce point a donc été retenu comme étant le meilleur indice pour caractériser la position de la langue.

En ce qui a trait à la forme, des analyses discriminantes ont également été effectuées afin de trouver les éléments pouvant le mieux caractériser les différences de formes entre les différentes voyelles. Étant donné que ces analyses discriminantes ont été faites à partir des données d'adultes en condition normale, ces éléments devaient assurer une dispersion suffisante pour pouvoir rendre compte des formes plus variables de langues des enfants et des formes atypiques susceptibles d'être retrouvées lors des productions perturbées. De plus, ces éléments devaient refléter quantitativement les observations qualitatives faites à la simple vue des différents contours.

Les éléments remplissant le mieux ces conditions sont donc les suivants (figure 3.11) : une mesure de la courbure du contour, et une mesure de la position de cette courbure. La courbure maximale est déterminée par le rapport entre la base du triangle AB et sa hauteur CD. La position de cette courbure est calculée en faisant le rapport du segment AD sur le segment DB, relié à la position de la ligne CD sur le segment AB.

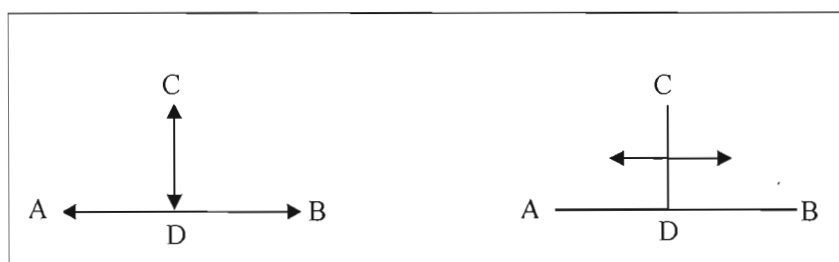


Figure 3.11 Détermination de la courbure (AB/CD) (gauche), et de la position de cette courbure (AD/DB) (droite).

Les analyses discriminantes ont révélé que la combinaison de ces indices permettait de classer correctement les voyelles [a], [i,y] et [u] dans 100 % des cas pour 3 des 4 locuteurs adultes, allant même, pour un de ces locuteurs, jusqu'à classer les [i] et les [y] correctement pour tous les cas. Cependant, pour le quatrième locuteur, cette analyse ne s'est pas révélée des plus efficaces, si l'on en croît les pourcentages issus des matrices de classification (100% pour [a], 95 % pour [i,y] et 60% pour [u]. Les scores de ce locuteur ont également été les plus faibles pour l'analyse discriminante précédente. Un examen visuel des contours linguaux de ce locuteur confirme que ces faibles pourcentages sont plutôt attribuables à la variabilité articulaire du locuteur qu'à la technique elle-même.

Afin de visualiser l'espace articulaire et la dispersion résultant de cette méthode d'analyse, les graphiques de la condition normale préperturbation ont été générés avec les éléments retenus. Sur ces graphiques, plus le chiffre représentant la courbure est bas, plus celle-ci est importante. Les graphiques représentant le locuteur pour qui les résultats des analyses discriminantes ont été les plus hauts (AL_a) et celui pour qui elles ont été les plus faibles (AC_a) sont illustrés aux figures 3.12 et 3.13.

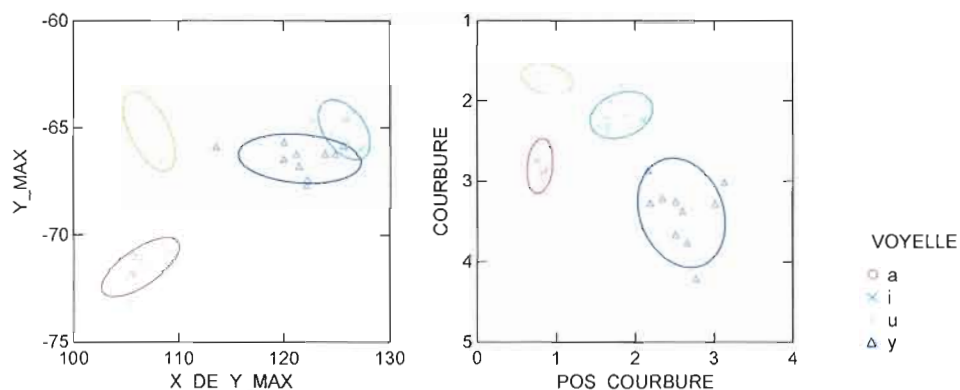


Figure 3.12 Représentation de la position (gauche) et de la forme de la langue (droite) pour le locuteur AL_a. Pour la position, les valeurs des axes sont en mm. Pour la forme, les valeurs n'ont aucune unité, puisqu'il s'agit de rapports. Pour les deux graphiques, les axes ont été inversés afin de suivre la disposition suggérée par le trapèze vocalique des voyelles.

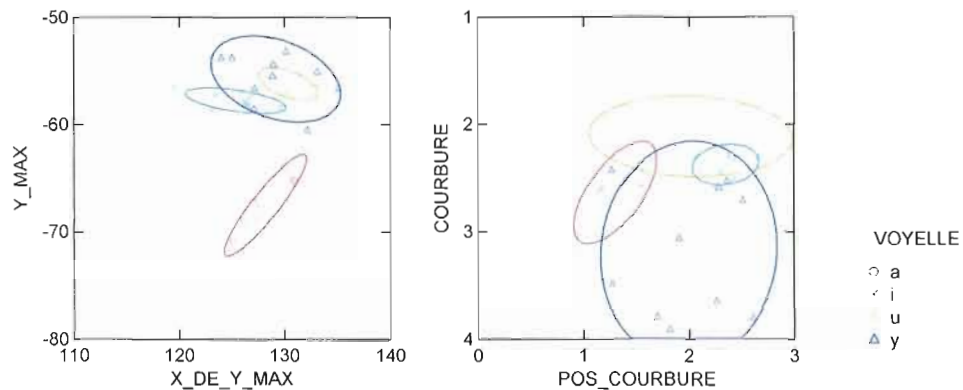


Figure 3.13 Représentation de la position (gauche) et de la forme de la langue (droite) pour le locuteur AC_a. Pour la position, les valeurs des axes sont en mm. Pour la forme, les valeurs n'ont aucune unité, puisqu'il s'agit de rapports. Pour les deux graphiques, les axes ont été inversés afin de suivre la disposition suggérée par le trapèze vocalique des voyelles.

Ces graphiques sont révélateurs dans la mesure où ils permettent de constater, premièrement, comment des contours de langue tels que ceux de [i] et [y] (locuteur AL_a, figure 3.12) peuvent avoir des positions du point maximal qui se ressemblent, tout en ayant des formes plus tranchées. Deuxièmement, ces graphiques montrent également que la variabilité dans la forme ne se traduit pas nécessairement par une variabilité par rapport à la position (voir les voyelles [i] et [u] du locuteur AC_a à la figure 3.13). Afin de mieux illustrer comment les éléments retenus peuvent illustrer les différences par rapport à la position mais les ressemblances par rapport à la forme, les contours des voyelles [a] et [y] du locuteur AC_a seront examinés. Comme le montre la figure 3.14, ces formes sont en effet très différentes par rapport à la position du point le plus élevé du contour, ce qui est également observable à la figure 3.13 (graphique de gauche). Cependant, en effectuant une légère rotation des contours de la voyelle [a] et en superposant ces derniers à ceux de la voyelle [y], il est facile de constater combien ces formes peuvent se ressembler (figure 3.15), justifiant ainsi le rapprochement entre les ellipses de la Figure 3.13 (graphique de droite).

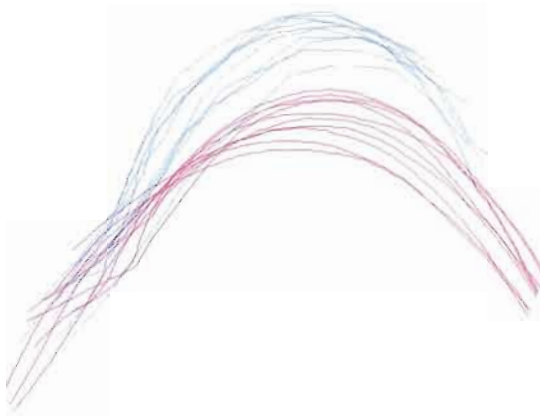


Figure 3.14 Contours de la langue lors de la production des voyelles /a/ (rouge) et /y/ (bleu).

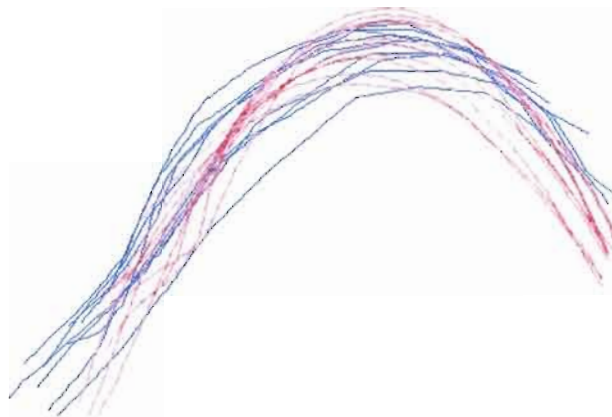


Figure 3.15 Contours de la langue lors de la production des voyelles /a/ (après rotation, en rouge) et /y/ (bleu).

À la suite de ces analyses discriminantes et de ces confirmations visuelles des résultats obtenus avec les éléments retenus, il semble que les indices *point maximal*, *courbure* et *position de la courbure* soient des éléments permettant une caractérisation adéquate des

contours de la langue aux plans de la forme et de la position de celles-ci. Aussi, ces dimensions ont l'avantage de se compléter puisque la position est un indice robuste face à des contours de langue potentiellement incomplets tandis que la forme sera moins affectée que la position s'il y a un léger déplacement de la sonde.

En s'inspirant d'éléments des techniques d'analyse existantes, tels que le point le plus élevé (Fant, 1960) et celui de courbure (Iskarous, 2005), une technique d'analyse quantitative a été développée, permettant de caractériser efficacement les contours de langue issus de l'ultrasonographie. Cependant, il est nécessaire de rappeler que ces éléments se situent sur un plan qui est déterminé par la sonde et non par le plancher de la bouche (figure 3.16). Les positions données par le point maximal ne seront donc pas directement sur les plans avant/arrière et haut/bas, puisqu'une élévation de ce point signifie également un léger recul. Le plan de la sonde, défini par l'angle auquel la sonde est placée sous le menton, varie légèrement en fonction des locuteurs. Cependant, les éléments utilisés pour faire la caractérisation sont assez robustes pour pallier ces différences.

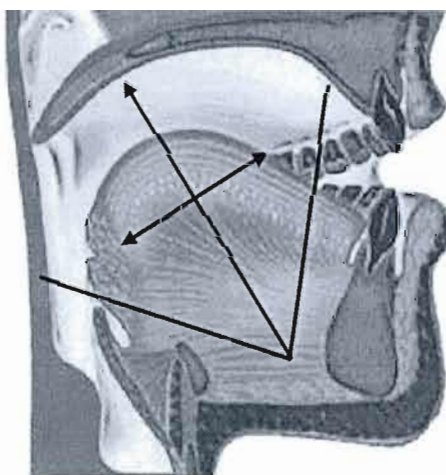


Figure 3.16 Plan d'imagerie relatif à la sonde, délimité par les lignes extérieures.

Il est également intéressant de voir si et comment ces dimensions peuvent être reliées au contrôle moteur de la langue, c'est-à-dire à ses différents muscles. Bien que l'orientation de la sonde de l'appareil à ultrasons ne soit pas perpendiculaire au plancher de la bouche, les

dimensions choisies pour caractériser la langue font en sorte que les axes se présentent de façon orthogonale. Il est alors intéressant de constater que l'orientation de ses axes peut facilement être reliée à l'orientation des muscles extrinsèques de la langue (figure 3.17). Les facteurs ici retenus pour caractériser la forme peuvent donc non seulement bien caractériser les voyelles, mais ont également un potentiel explicatif au niveau du contrôle musculaire.

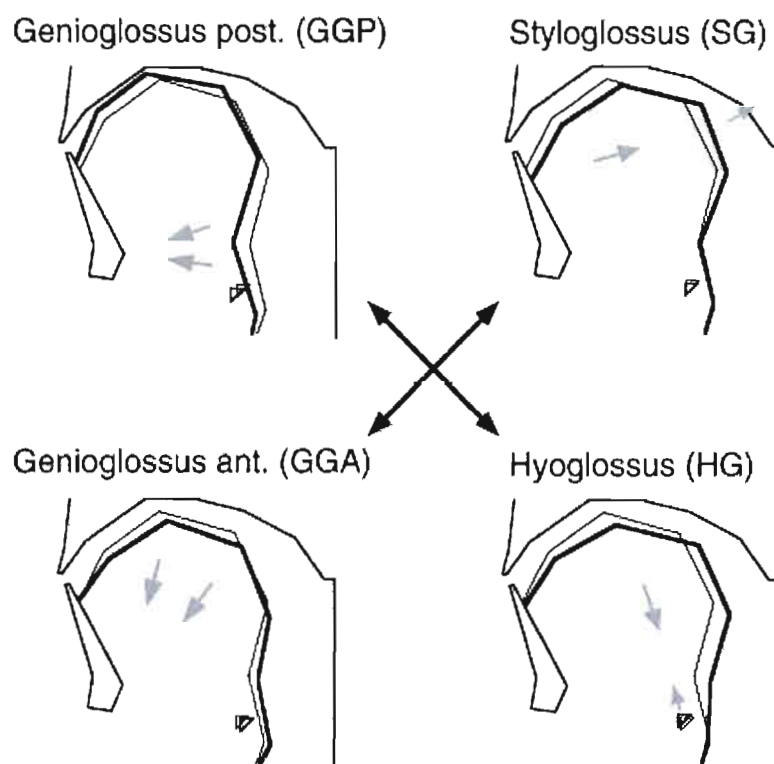


Figure 3.17 Effets des muscles extrinsèques de la langue montrant une relation orthogonale parmi les muscles antagonistes. Le génioglosse postérieur (GGP) et le hyoglosse (HG) forment une paire antagoniste majeure, et le styloglosse (SG) et le génioglosse antérieur forment une autre paire de muscles antagonistes. Les triangles indiquent la position de l'os hyoïde. (Tirée de Honda (1996)).

Cette nouvelle technique d'analyse s'est avérée fort efficace pour décrire à la fois la position et la forme de la langue, lors de l'étude des productions de la condition normale préperturbation faites par les adultes. Pour chaque locuteur, les formes de langue de chaque voyelle seront donc caractérisées dans ces deux dimensions. Ces caractérisations permettront de faire des corrélations articulatoire-acoustiques et de traduire les variations de forme et de position en termes de valeurs par rapport à la condition normale.

3.2 Résultats

Les résultats de ces tests de production seront présentés par types de données, en débutant par les données acoustiques, suivies des données articulatoires pour finir par des corrélations articulatoire-acoustiques. Les résultats globaux de chaque groupe seront ainsi exposés, suivis de ceux spécifiques à chaque locuteur.

3.2.1 Résultats des données acoustiques

Les données analysées et mises en graphiques ont été celles permettant de déterminer et d'illustrer le mieux possible les caractères \pm complet et \pm immédiat des compensations. Pour vérifier si les locuteurs ont pu corriger les paramètres acoustiques à l'aide du feedback auditif, les valeurs acoustiques à la première vibration périodique de chaque voyelle en condition perturbée ont été comparées à celles prises au milieu des voyelles à l'aide de tests de Student pairés. Ces tests ont été effectués de façon indépendante pour les sujets enfants et pour les sujets adultes. Les résultats globaux pour tous les locuteurs de chaque groupe sont présentés au tableau 3.2. Un total de 2040 valeurs acoustiques ont été comparées et le sujet enfant MAL_a, pour qui les valeurs n'ont pu être prises qu'au centre des voyelles, n'a pas été inclus dans ces analyses.

Tableau 3.2 Résultat des tests de Student pairés montrant les différences, pour la fréquence fondamentale et les quatre premiers formants, entre les valeurs prises au début des voyelles et celles prises au milieu (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

Voyelle	Paramètre	Adultes	Enfants
		t	t
i	F0	-8.889 ***	1.985
	F1	5.980 ***	1.583
	F2	1.413	0.413
	F3	4.581 ***	0.808
	F4	2.423 *	1.098
y	F0	-4.902 ***	3.279 **
	F1	2.235 *	7.762 ***
	F2	1.270	-1.900
	F3	4.633 ***	0.098
	F4	4.528 ***	-0.870
u	F0	-6.359 ***	1.102
	F1	5.447 ***	8.699 ***
	F2	5.339 ***	3.056 **
	F3	0.418	-0.864
	F4	3.444 **	3.343 **

Une différence significative est observée dans 80% des cas chez les adultes et dans 30% des cas chez les enfants. Chez ces derniers, ce sont les formants de la voyelle [i] qui divergent le moins, tandis que chaque voyelle est affectée de manière égale chez les adultes, ce qui signifie que les trajectoires des formants évoluent à l'intérieur d'une même voyelle lors de la production des stimuli en condition de perturbation. Il est à noter que les deuxième formants de [i] et [y] et le troisième formant de [u] sont ceux qui semblent les plus robustes face à cette évolution temporelle. Étant donné les différences observées et le fait que les valeurs au milieu des voyelles sont susceptibles de refléter d'avantage les caractéristiques spectrales de celles-ci, les valeurs acoustiques recueillies lors de la première pulsation glottique périodique ne seront pas prises en compte dans les résultats présentés.

Pour déterminer si la condition dans laquelle les stimuli étaient prononcés (normale préperturbation (n1), perturbation (p), normale postperturbation (n2)) affectait globalement les valeurs formantiques moyennes au long des 10 répétitions, des analyses de variance (ANOVAs) à un facteur à mesures répétées ont donc été faites sur les mesures au milieu des

voyelles. Ces analyses ont d'abord été faites globalement avec tous les sujets pour déterminer si l'âge et la condition seules et de manière combinée avaient une influence significative sur les valeurs acoustiques. Le tableau 3.3 montre que le facteur âge, seul ou combiné au facteur condition, a peu d'influence sur la variation des valeurs acoustiques dans les trois conditions. En effet, il n'y a que pour le deuxième et le troisième formant de la voyelle [i] et pour le quatrième formant des voyelles [y] et [u] que les différences sont significatives. Par les résultats de cette première analyse, il ne semble donc pas que l'ampleur des différences acoustiques d'une condition à l'autre varie chez les adultes et chez les enfants.

Tableau 3.3 Effet du facteur âge et des facteurs condition et âge sur les valeurs acoustiques

(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

Voyelle	Paramètre	Condition x Âge		Âge	
		F	P	F	P
i	F0	0.195	0.826	0.920	0.425
	F1	0.904	0.431	0.164	0.850
	F2	7.414	0.008**	17.430	0.000***
	F3	0.250	0.783	4.444	0.036*
	F4	1.940	0.186	3.214	0.076
y	F0	0.067	0.935	1.933	0.187
	F1	0.444	0.652	3.355	0.070
	F2	1.669	0.229	0.097	0.908
	F3	0.798	0.473	0.960	0.411
	F4	3.256	0.074	4.006	0.046*
u	F0	0.519	0.608	1.935	0.187
	F1	1.418	0.280	2.804	0.100
	F2	0.322	0.731	0.481	0.630
	F3	0.223	0.803	0.382	0.690
	F4	3.962	0.048*	12.211	0.001

Ensuite, les analyses ont été faites séparément pour la fréquence fondamentale et pour chacun des quatre premiers formants, pour chaque voyelle. Chaque sujet représentait un cas et les données des adultes ont été analysées séparément de celles des enfants. Les figures 3.18 à 3.22 illustrent les rapports, en pourcentage, des valeurs moyennes des conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2), par rapport aux valeurs moyennes des locuteurs en condition normale préperturbation (n1). Ce type de représentation a été choisi parce qu'il permet de passer outre les différences interlocuteurs, ce qui n'est pas possible en utilisant les

valeurs formantiques telles quelles. Les résultats de ces analyses statistiques sont disponibles en annexe, à l'appendice A. Les effets significatifs de la condition sur les valeurs des formants sont présentés au tableau 3.3.

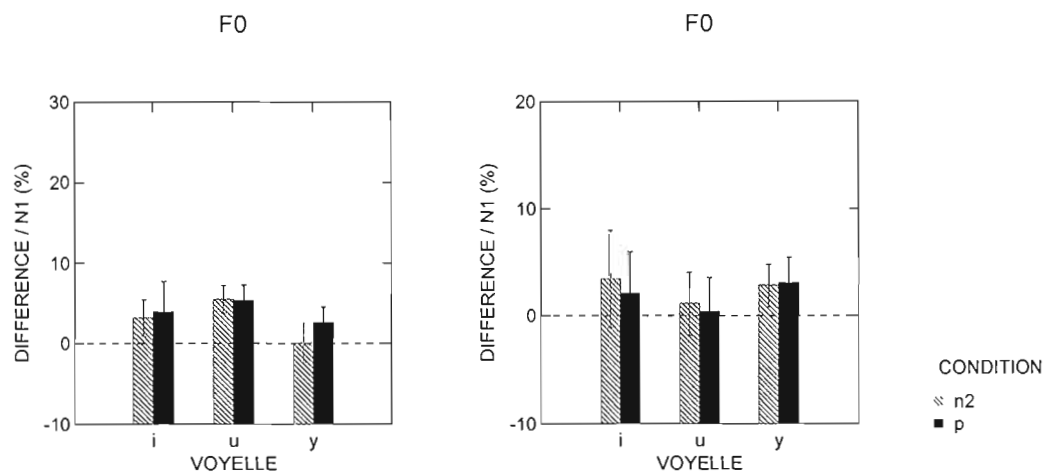


Figure 3.18 Pourcentage de changement de la fréquence fondamentale moyenne des conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation (ligne horizontale) au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes (gauche) et enfants (droite). *=effet significatif entre les conditions indiquées, pour cette voyelle, pour ce groupe de locuteurs.

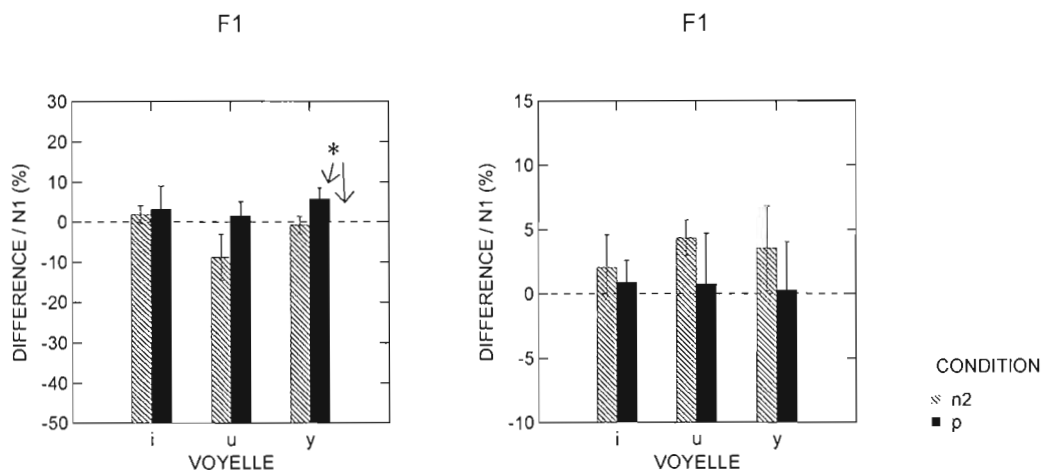


Figure 3.19 Pourcentage de changement du premier formant lors des conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation (ligne horizontale) au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes (gauche) et enfants (droite). *=effet significatif entre les conditions indiquées, pour cette voyelle, pour ce groupe de locuteurs.

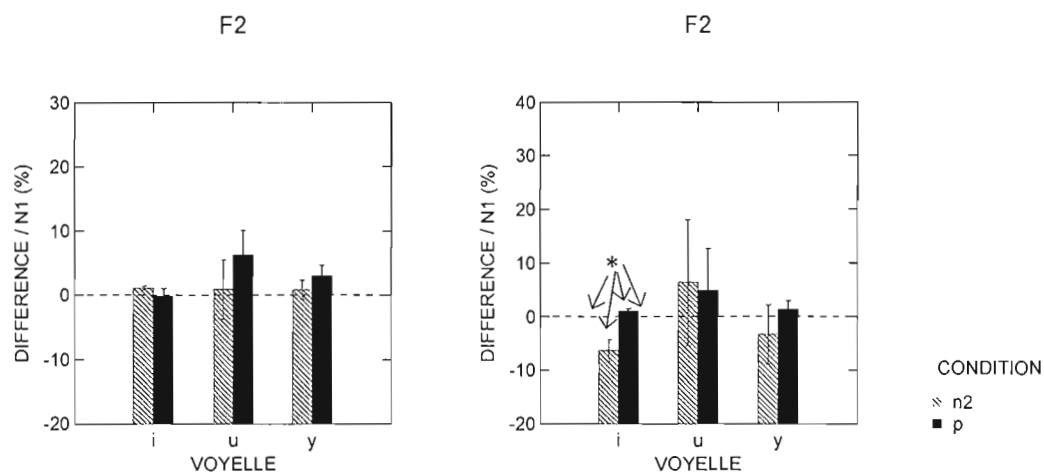


Figure 3.20 Pourcentage de changement du deuxième formant lors des conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation (ligne horizontale) au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes (gauche) et enfants (droite). *=effet significatif entre les conditions indiquées, pour cette voyelle, pour ce groupe de locuteurs.

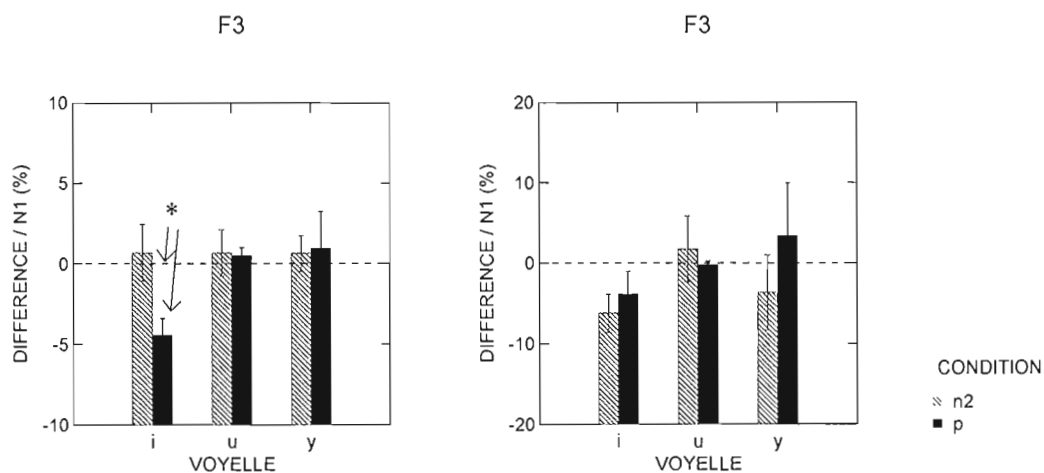


Figure 3.21 Pourcentage de changement du troisième formant lors des conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation (ligne horizontale) au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes (gauche) et enfants (droite). *=effet significatif entre les conditions indiquées, pour cette voyelle, pour ce groupe de locuteurs.

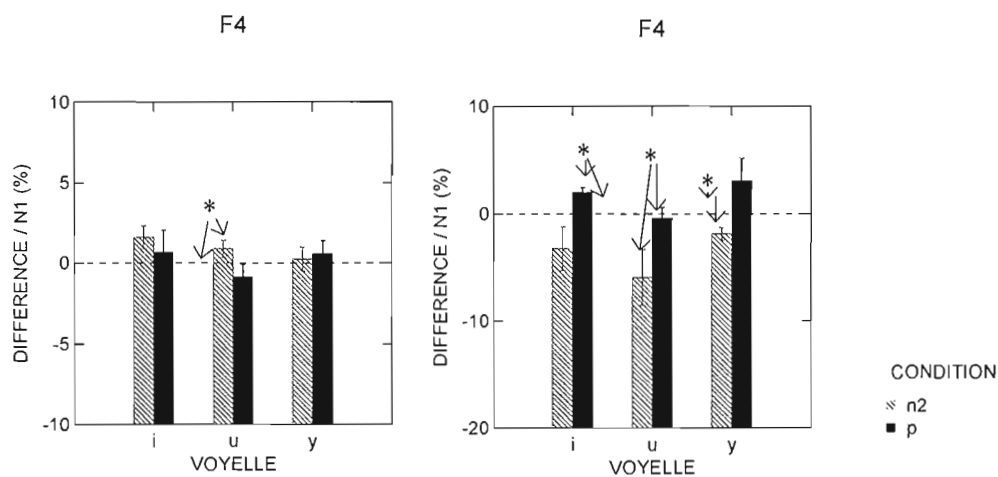


Figure 3.22 Pourcentage de changement du quatrième formant lors des conditions perturbée (p) et normale postperturbation (n2) par rapport à la condition normale préperturbation (ligne horizontale) au cours des 10 répétitions, pour les sujets adultes (gauche) et enfants (droite). *=effet significatif entre les conditions indiquées, pour cette voyelle, pour ce groupe de locuteurs.

De manière générale, les différences sont peu marquées entre les conditions en ce qui a trait aux valeurs moyennes des 10 répétitions. De plus, il est facile de remarquer la présence d'écart types importants, révélant la variabilité des productions lors de ces différentes répétitions. Pour étudier cette variabilité, les valeurs des trois premiers formants de chaque voyelle ont été placées dans des plans F1 vs F2 et F2 vs F3, et des ellipses reflétant la dispersion de ces valeurs (± 2 écarts-types) pour les trois conditions ont été tracées. La variabilité des productions se trouve donc proportionnelle aux dimensions des ellipses. Afin de déterminer l'effet de la condition de production sur la variabilité de ces productions, des analyses de variance à mesure répétées ont été effectuées sur ces valeurs d'aire. Chaque groupe et chaque plan acoustique ont été analysés séparément, pour chaque voyelle. Les valeurs moyennes de ces aires (en Hz^2) sur le plan F1 vs F2 et F2 vs F3 sont représentées aux figures 3.23 et 3.24.

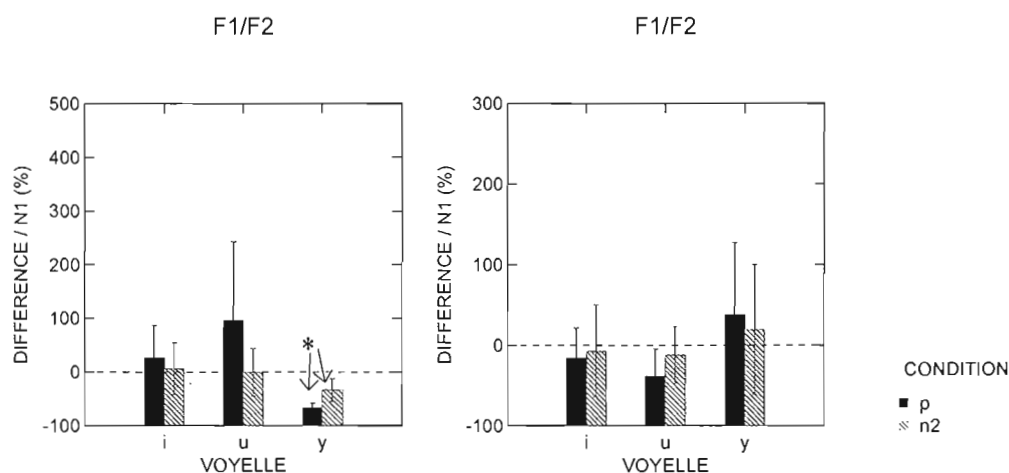


Figure 3.23 Pourcentage de changement des aires des ellipses sur le plan F1 VS. F2 lors des différentes conditions de production, pour les adultes (gauche) et les enfants (droite). *=effet significatif entre les conditions indiquées, pour cette voyelle, pour ce groupe de locuteurs.

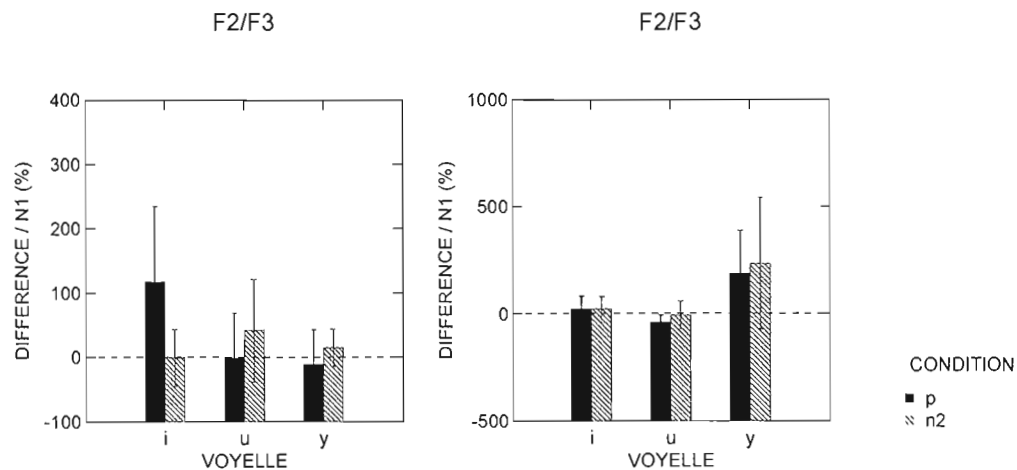


Figure 3.24 Pourcentage de changement de aires des ellipses sur le plan F2 VS. F3 lors des différentes conditions de production, pour les adultes (gauche) et les enfants (droite). *=effet significatif entre les conditions indiquées, pour cette voyelle, pour ce groupe de locuteurs.

Les résultats des analyses de variance (voir annexe, appendice A) ont montré que lorsque les valeurs des tous les locuteurs d'un même groupe étaient réunies, la condition de production a une influence minime sur les dimensions de ces ellipses. En effet, seules les valeurs pour la voyelle [y] chez les adultes sont significativement différentes ($F(2,6)$, $p=0.037$).

Comme pour les valeurs formantiques, les moyennes des valeurs d'aires ne sont généralement pas différentes, mais des écarts types importants sont observés (100% en moyenne pour les adultes et 148% pour les enfants). L'analyse de variance (ANOVA), qui est une mesure utilisée pour comparer des moyennes, ne peut pas rendre bien compte du phénomène lorsqu'une telle variabilité est observée au cours des 10 répétitions. Cette variabilité était attendue puisque les résultats des études précédentes ont révélé que lors de ces 10 répétitions, il pouvait se produire des améliorations (si les valeurs se rapprochent de la condition n1) ou alors des productions de type essai erreur. Les écarts types observés reflètent probablement ce phénomène, c'est pourquoi des analyses se basant sur les moyennes des 10 répétitions ne permettent pas adéquatement de déterminer la capacité des sujets à compenser plus ou moins efficacement.

Après avoir étudié les résultats de manière globale pour chacun des groupes, il est intéressant de regarder les résultats individuels de chacun des sujets afin d'étudier cas par cas la capacité des locuteurs à élaborer des stratégies compensatrices efficaces. Pour chaque voyelle, seront présentées, pour chaque sujet, des figures représentant (1) les ellipses de dispersion sur les plans F1 vs F2 et F2 vs F3, (2) l'évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4 au long des 10 répétitions, et (3) les différences en Bark des formants convergents. Pour les ellipses de dispersion, les éléments sur lesquels une attention particulière sera portée sont la position des ellipses dans le plan (par rapport aux axes et entre les ellipses elles-mêmes) et la dimension des ellipses. Ces éléments sont de bons indices pour déterminer si la compensation faite par le locuteur a été efficace ou non, et s'il y a présence d'un effet postperturbation. La figure 3.25 illustre les principaux cas possibles.

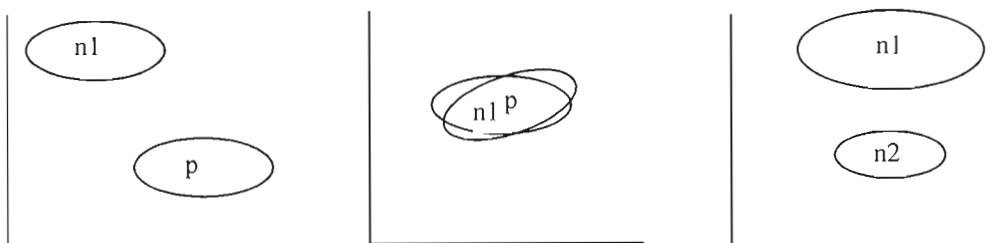


Figure 3.25 Différents cas possibles de positionnement d'ellipses.

Les ellipses de gauche, où les ellipses n1 et p (condition normale préperturbation et perturbée) sont éloignées, illustre un cas de compensation incomplète ou nulle. Les ellipses du centre, superposées, représentent un cas de compensation complète. Des ellipses superposées en partie représenteraient un cas de compensation partielle. Quant aux ellipses de droite, elles indiquent un effet postperturbation, puisque les valeurs en n2 (condition normale postperturbation) sont différentes de celles en n1. De plus, l'ellipse n2 est plus concentrique, signifiant que les productions faites dans cette condition ont été plus stables acoustiquement.

Bien que les valeurs des formants au long des dix répétitions puissent être représentées globalement par les ellipses de dispersion, le graphique regroupant les valeurs de chacun des

formants permet un examen individuel de chaque répétition et inclut la trajectoire de la fréquence fondamentale. Cette dernière peut également indiquer un effet postperturbation et est donc un élément important. Finalement, en ce qui a trait aux différences des formants convergents, quelques patrons typiques d'évolution temporelle des trajectoires risquent d'apparaître. Ces patrons sont représentés par la figure 3.26. Ici aussi, l'emplacement de la trajectoire de la condition n2 peut indiquer un effet postperturbation.

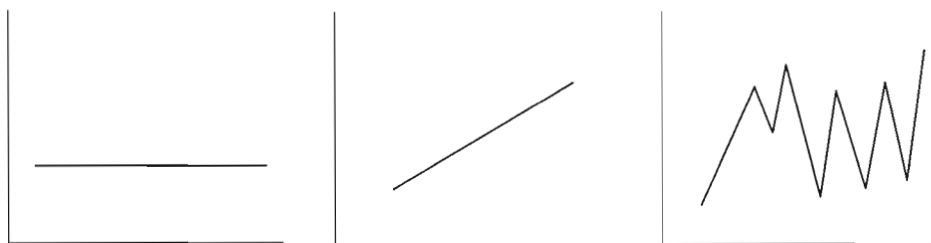


Figure 3.26 Patrons d'évolution des trajectoires des différences des formants convergents. À gauche, une trajectoire stable, ne montrant pas de variation. Au centre, une trajectoire montante reflétant une progression (la trajectoire pourrait également être descendante et refléter une progression dans l'autre sens). À droite, une trajectoire en dents de scie, caractéristique des productions de style essais erreurs.

Ce sont donc sur ces éléments que l'attention sera plus particulièrement portée afin de décrire les changements acoustiques occasionnés par la perturbation. Les résultats seront présentés en ordre pour les voyelles [i], [y] et [u]. Après avoir présenté les figures des valeurs de chaque groupe de locuteurs pour chacune de ces voyelles, une description des tendances majeures observées sera faite. À la fin de la présentation des résultats des données acoustiques, des tableaux résumant les principales différences significatives et la direction de ces effets seront présentés. Les figures 3.27 à 3.30 représentent les résultats acoustiques de la voyelle [i] pour les locuteurs adultes.

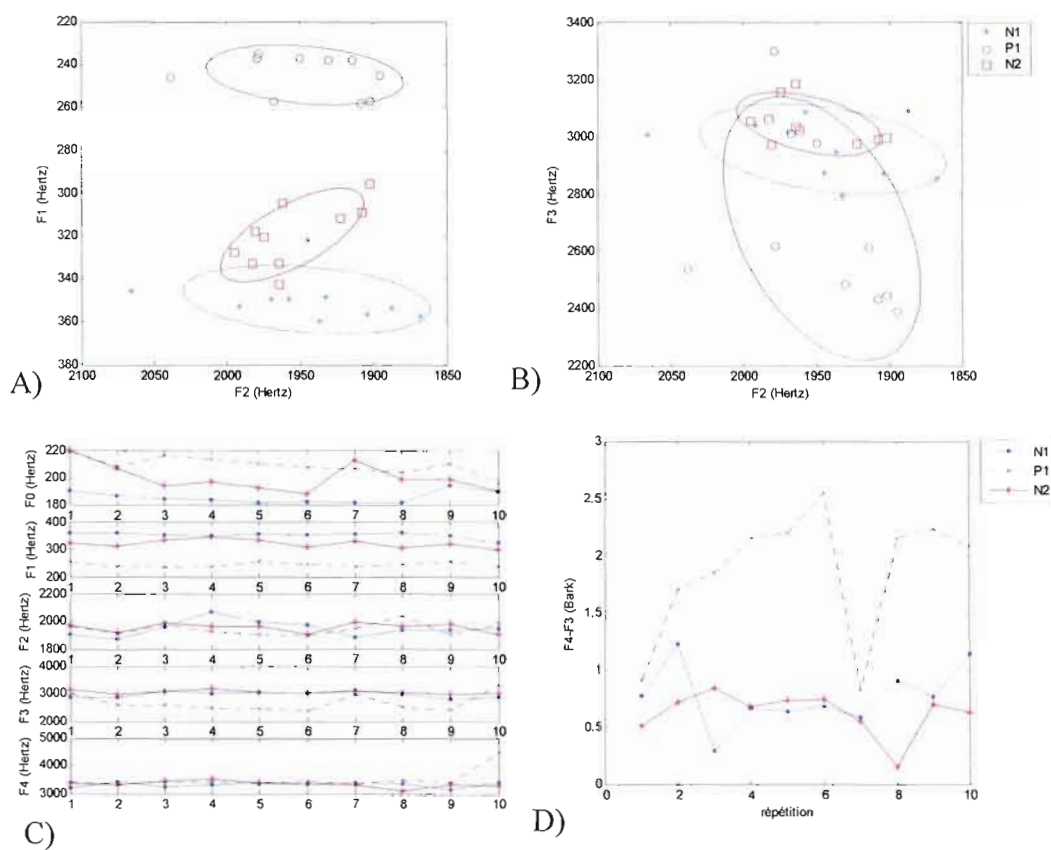


Figure 3.27 Résultats acoustiques pour la voyelle [i] du locuteur AC_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 3 et 4, en Bark.

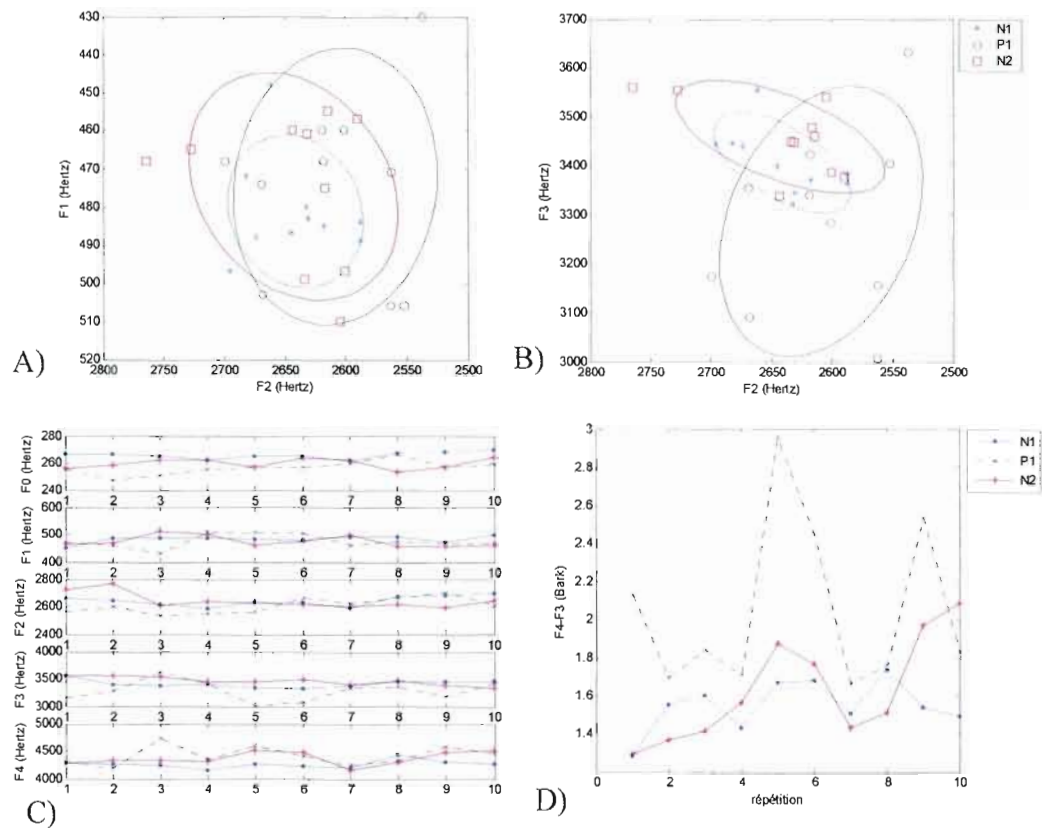


Figure 3.28 Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice AL_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 3 et 4, en Bark.

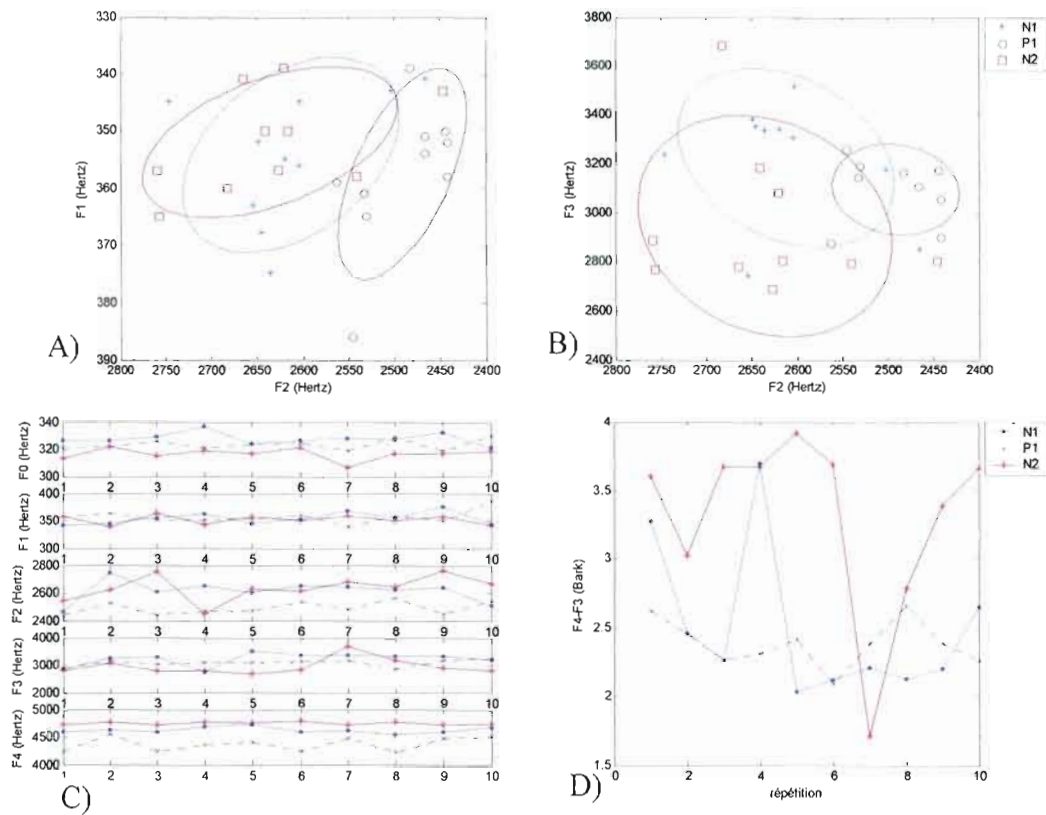


Figure 3.29 Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice JR_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan $F1$ vs $F2$, B) Ellipses de dispersion sur le plan $F2$ vs $F3$, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 3 et 4, en Bark.

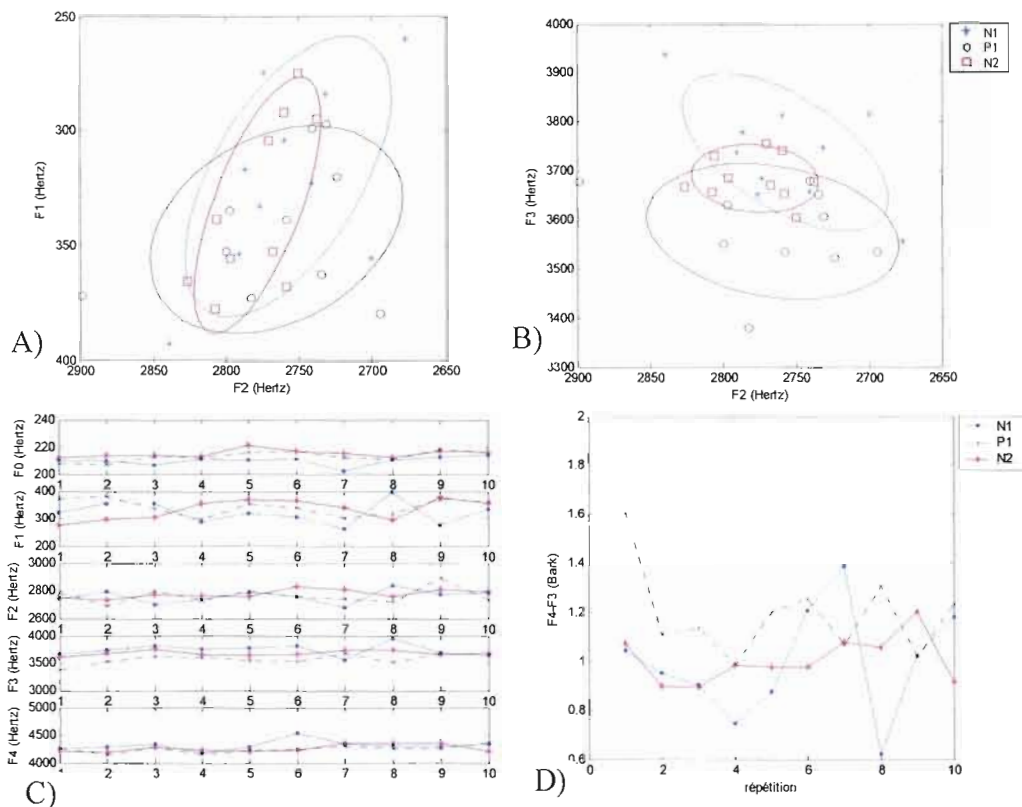


Figure 3.30 Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice MB_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 3 et 4, en Bark.

En ce qui concerne la position des ellipses pour la voyelle [i] produite par les locuteurs adultes, les locutrices JR_a et MB_a ont fait une bonne compensation sur le plan F1 vs. F2, tandis que la condition perturbée a entraîné une baisse de F1 pour AC_a et une baisse de F2 pour JR_a. Les valeurs du troisième formant n'ont été affectées que pour AC_a et MB_a. Un effet postperturbation peut être observé en F1 vs. F2 pour le locuteur AC_a. Cet effet n'est présent chez aucun locuteur en ce qui a trait à la convergence de F3 et F4. Il est intéressant de remarquer que tous les locuteurs ont modifié leur fréquence fondamentale en condition

perturbée. Cette modification n'a cependant pas toujours été dans la même direction, puisque les locuteurs AC_a et MB_a ont augmenté leur F0, à l'inverse des sujets AL_a et JR_a.

Après avoir regardé les tendances majeures pour la voyelle [i] chez les adultes, les Figures 3.31 à 3.33 permettront d'évaluer celles présentes chez les enfants.

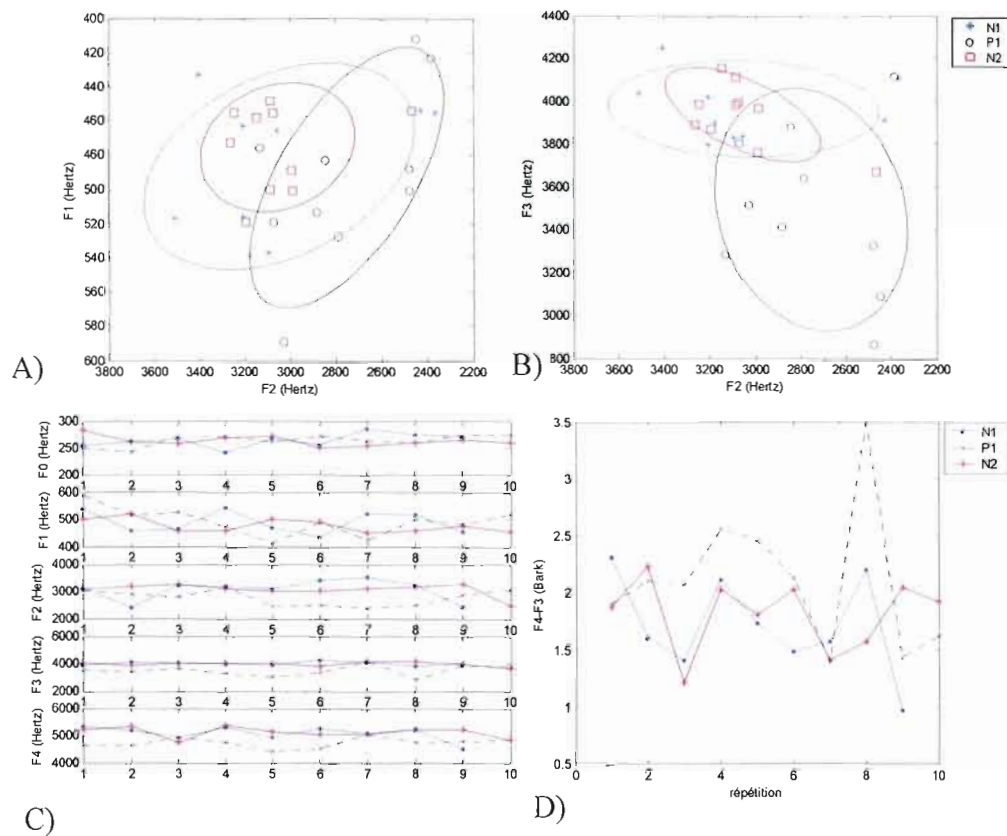


Figure 3.31 Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice BP_e : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 3 et 4, en Bark.

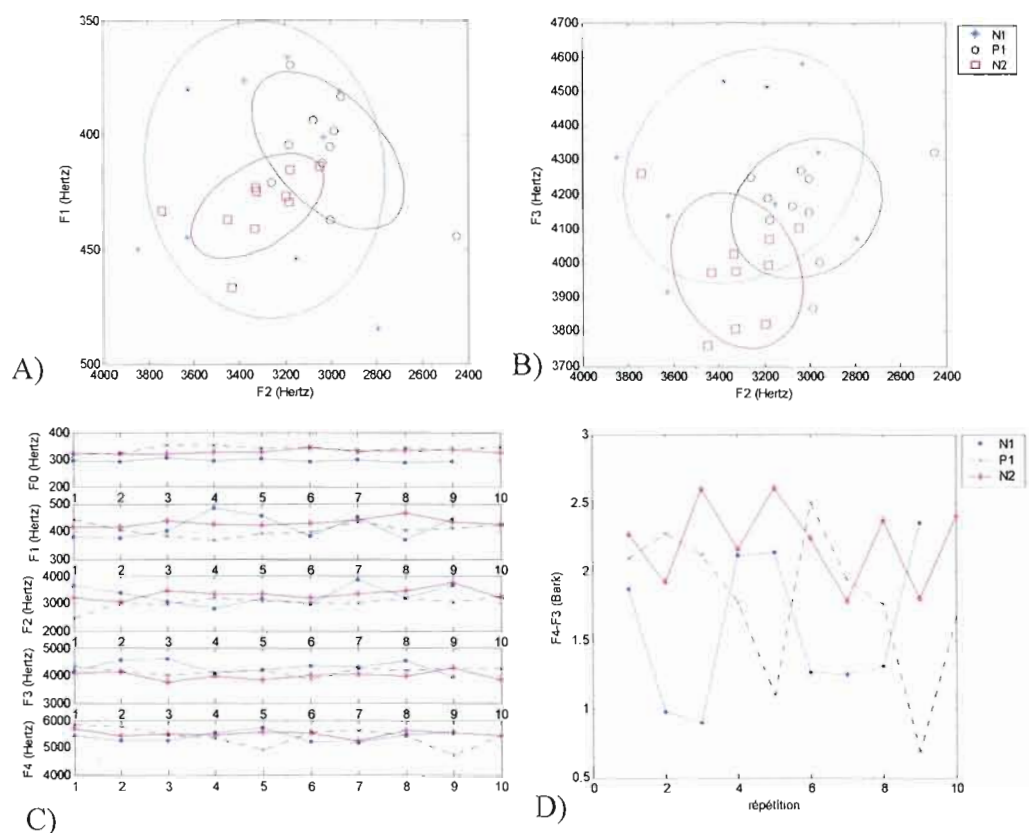


Figure 3.32 Résultats acoustiques pour la voyelle [i] du locuteur JC_e : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 3 et 4, en Bark.

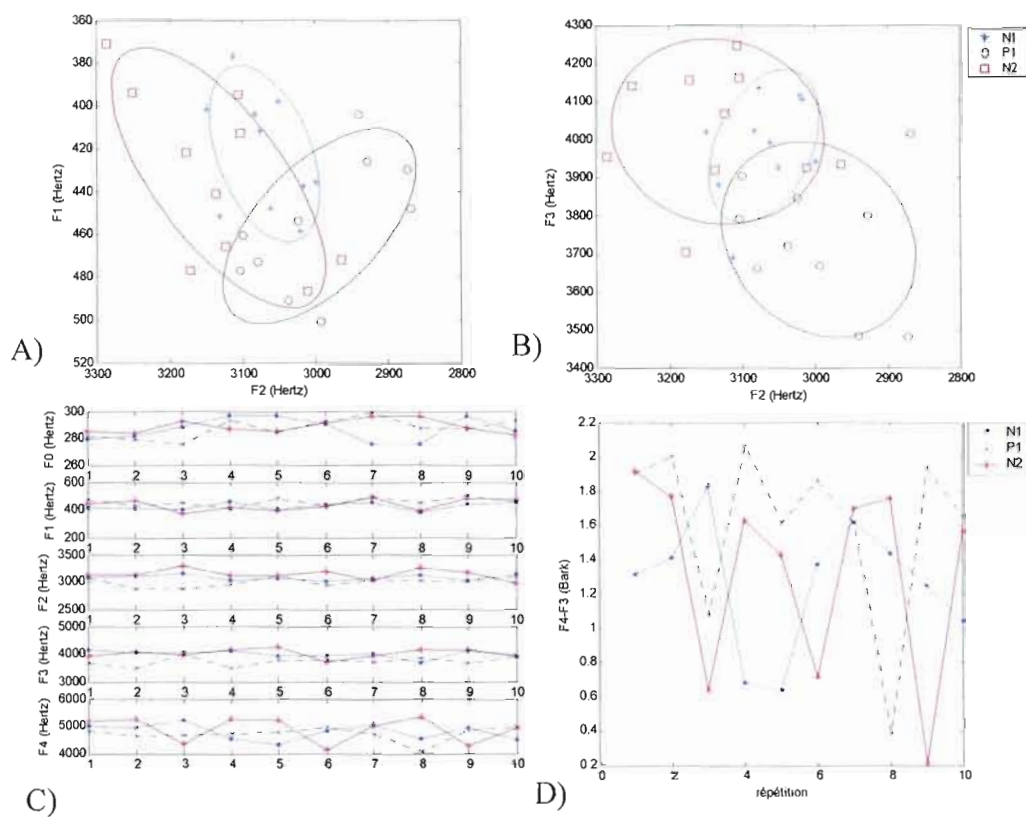


Figure 3.33 Résultats acoustiques pour la voyelle [i] du locuteur LB_e : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 3 et 4, en Bark.

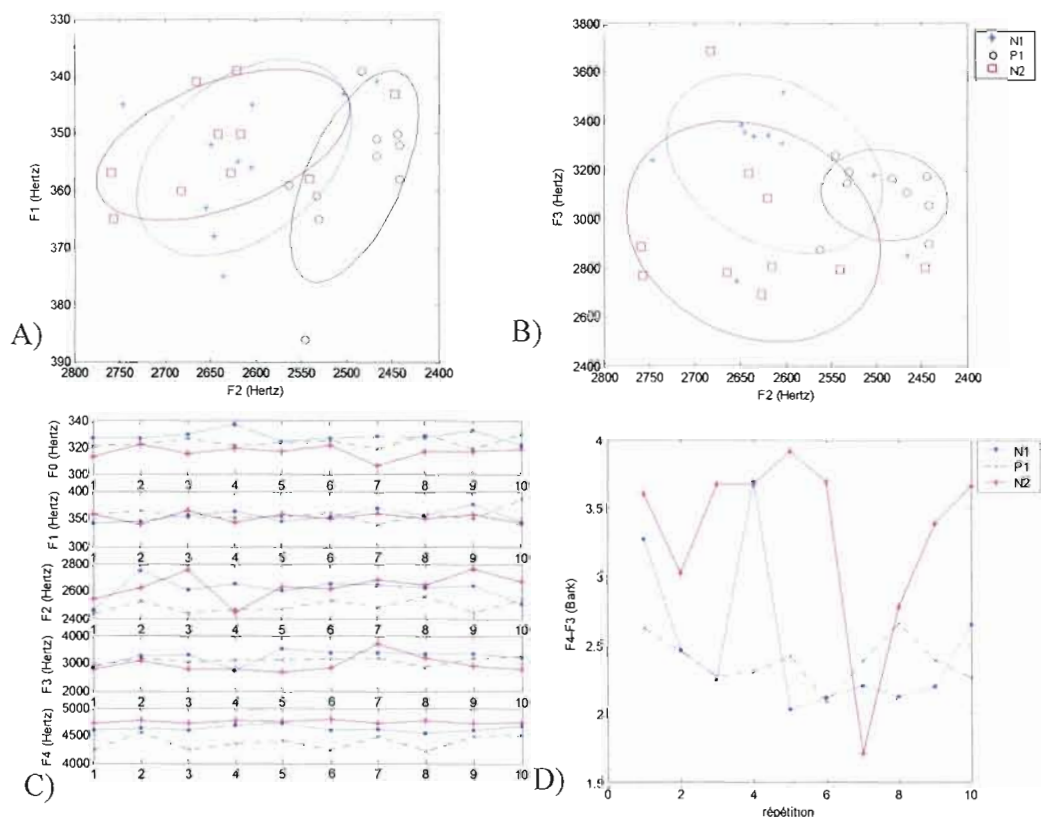


Figure 3.34 Résultats acoustiques pour la voyelle [i] de la locutrice MC_e : A) Évolution de la fréquence fondamentale et des formant 1 à 4, B) Ellipses de dispersion sur le plan F1 VS. F2, C) Ellipses de dispersion sur le plan F2 VS. F3, D) Différence des formants 3 et 4, en Bark.

Pour deux des sujets enfants (BP_e et JC_e), la perturbation de la voyelle [i] n'a pas eu d'influence sur le plan F1 vs. F2. Le troisième formant a été affecté seulement chez BP_e et LB_e. Deux enfants ont modifié leur fréquence fondamentale en condition perturbée, soit JC_e et MC_e. Il faut aussi noter les trajectoires en dents de scie des formants convergents.

Les résultats pour la voyelle [y] seront présentés de la même façon que pour la voyelle [i], en commençant tout d'abord par présenter les résultats des adultes (Figures 3.35 à 3.38).

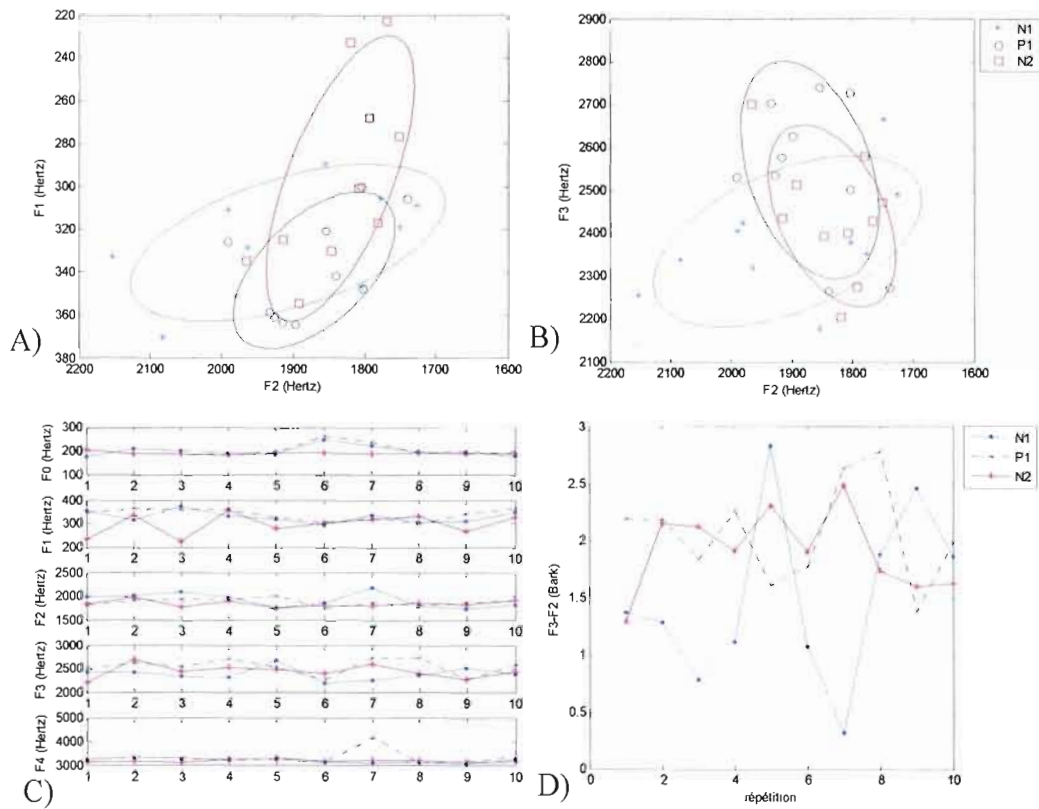


Figure 3.35 Résultats acoustiques pour la voyelle [y] du locuteur AC_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 2 et 3, en Bark.

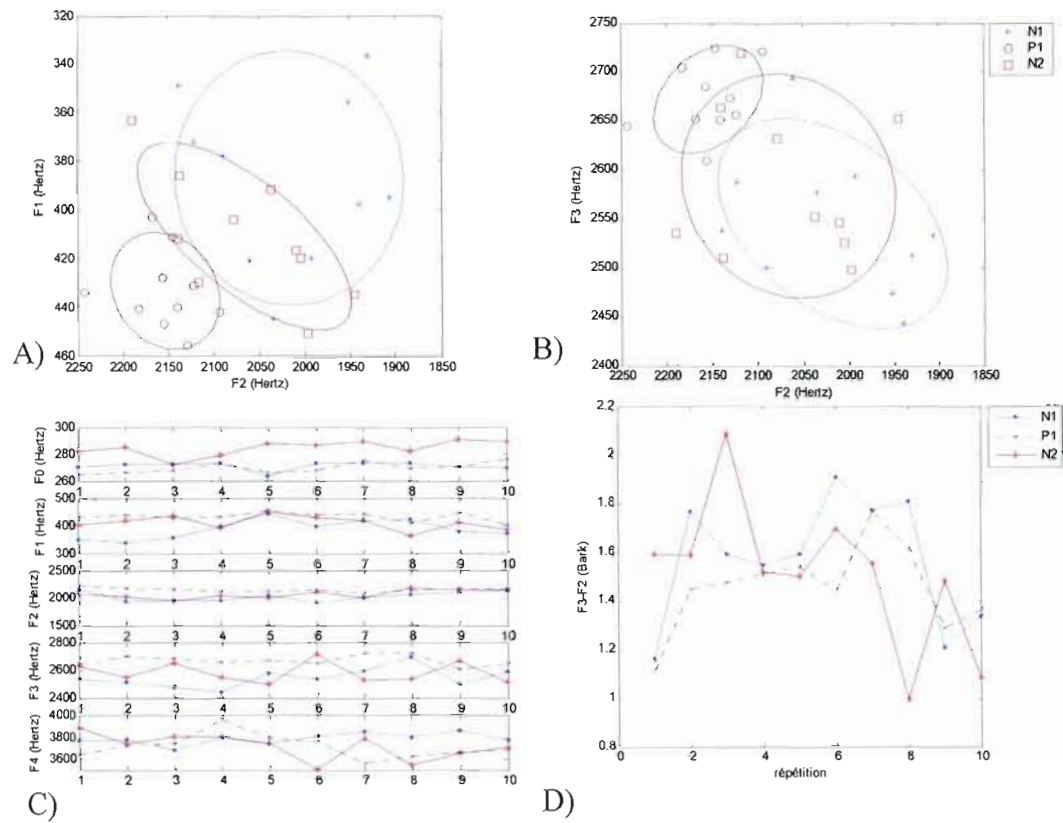


Figure 3.36 Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice AL_a : Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 2 et 3, en Bark.

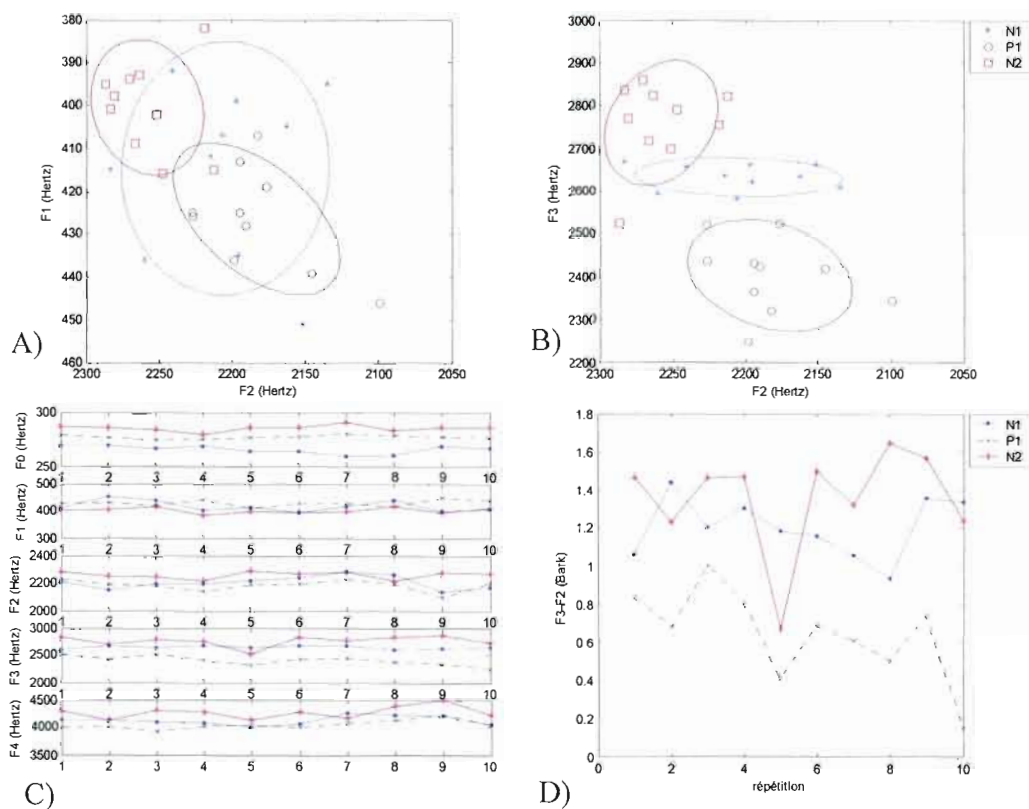


Figure 3.37 Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice JR_a : Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 2 et 3, en Bark.

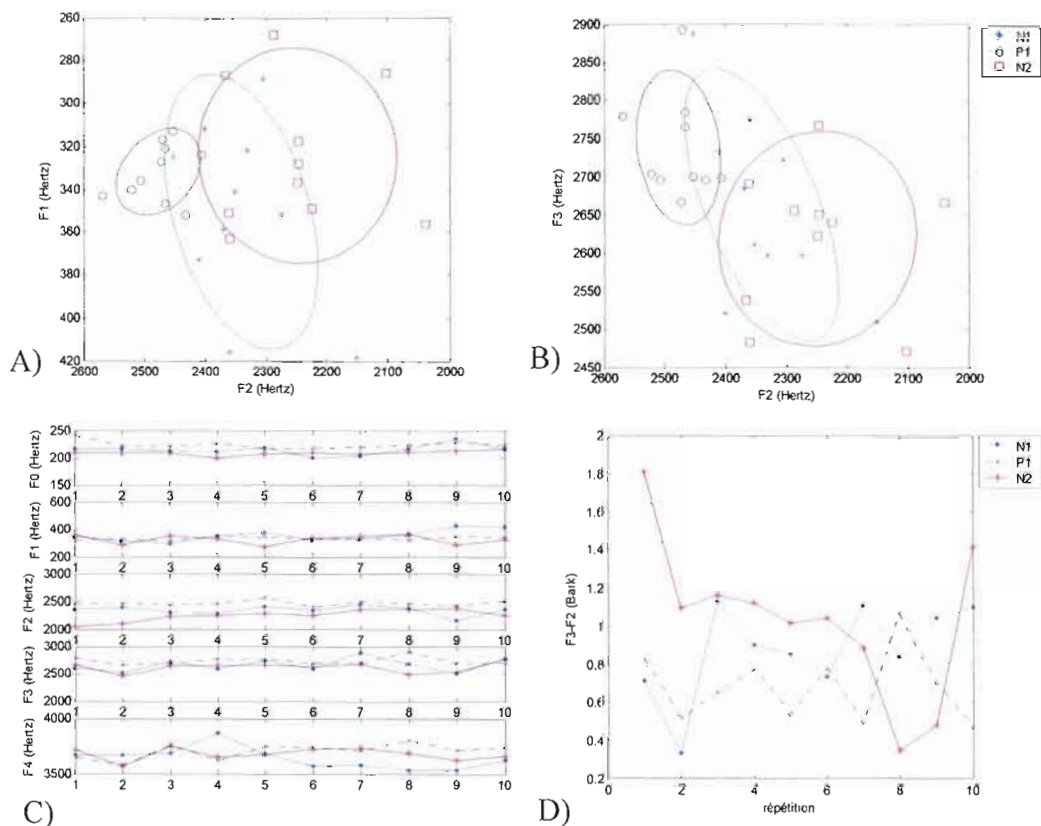


Figure 3.38 Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice MB_a Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 2 et 3, en Bark.

Un changement important occasionné par la perturbation de cette voyelle a été le changement en F3. En effet, les locuteurs AC_a et AL_a ont augmenté significativement les valeurs de ce formant, tandis que celles de la locutrice JR_a ont subi une importante baisse. La fréquence fondamentale s'est vue augmentée pour deux sujets (JR_a et MB_a). Finalement, la focalisation des formants deux et trois a été plus importante en condition perturbée pour la locutrice JR_a.

Les Figures 3.39 à 3.42 présentent les résultats de la voyelle [y] produite par les enfants.

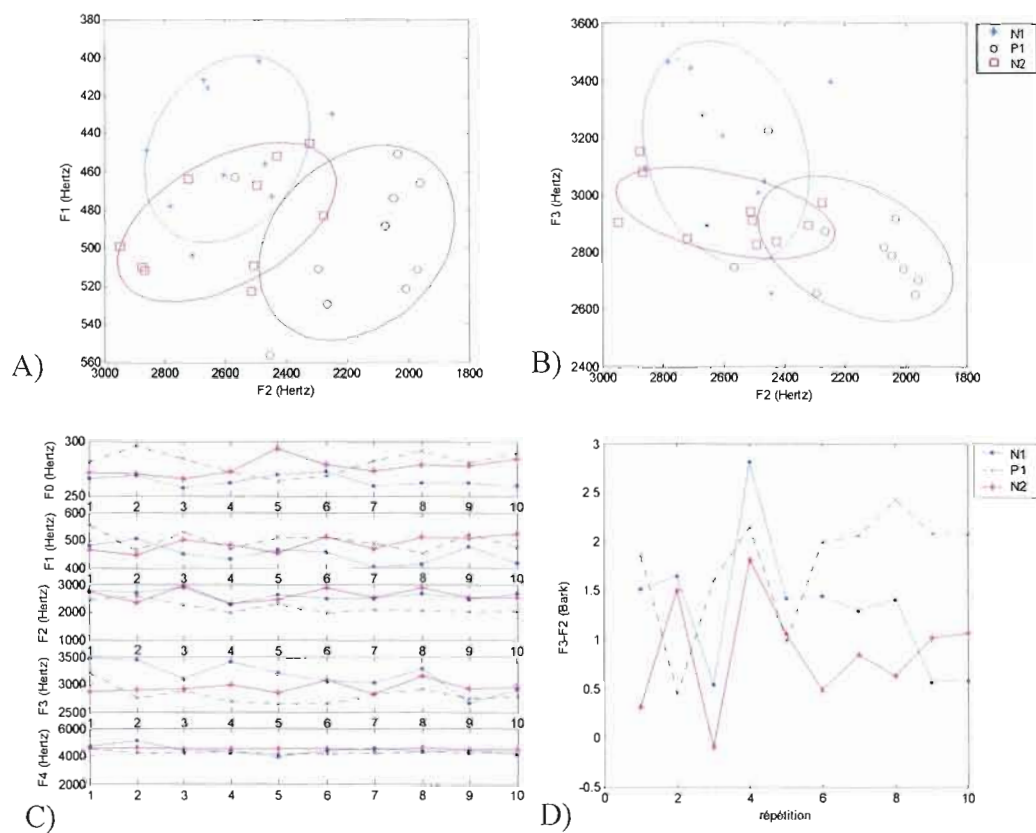


Figure 3.39 Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice BP_e : Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 2 et 3, en Bark.

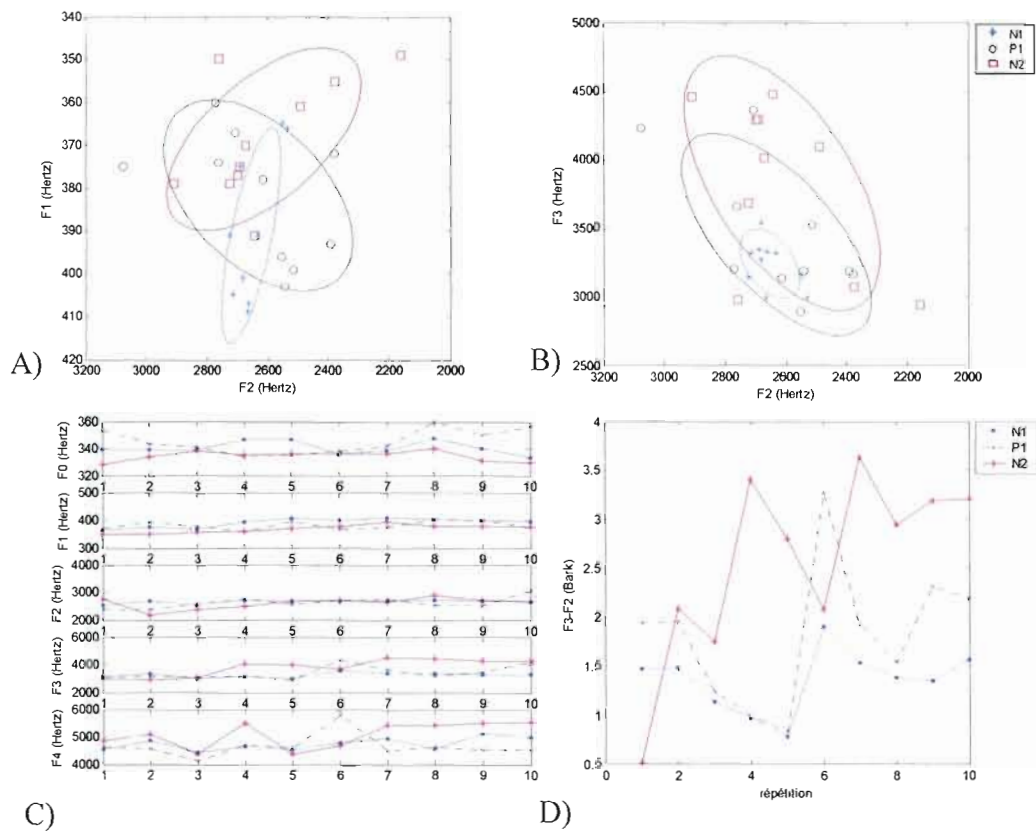


Figure 3.40 Résultats acoustiques pour la voyelle [y] du locuteur JC_e : Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 2 et 3, en Bark.

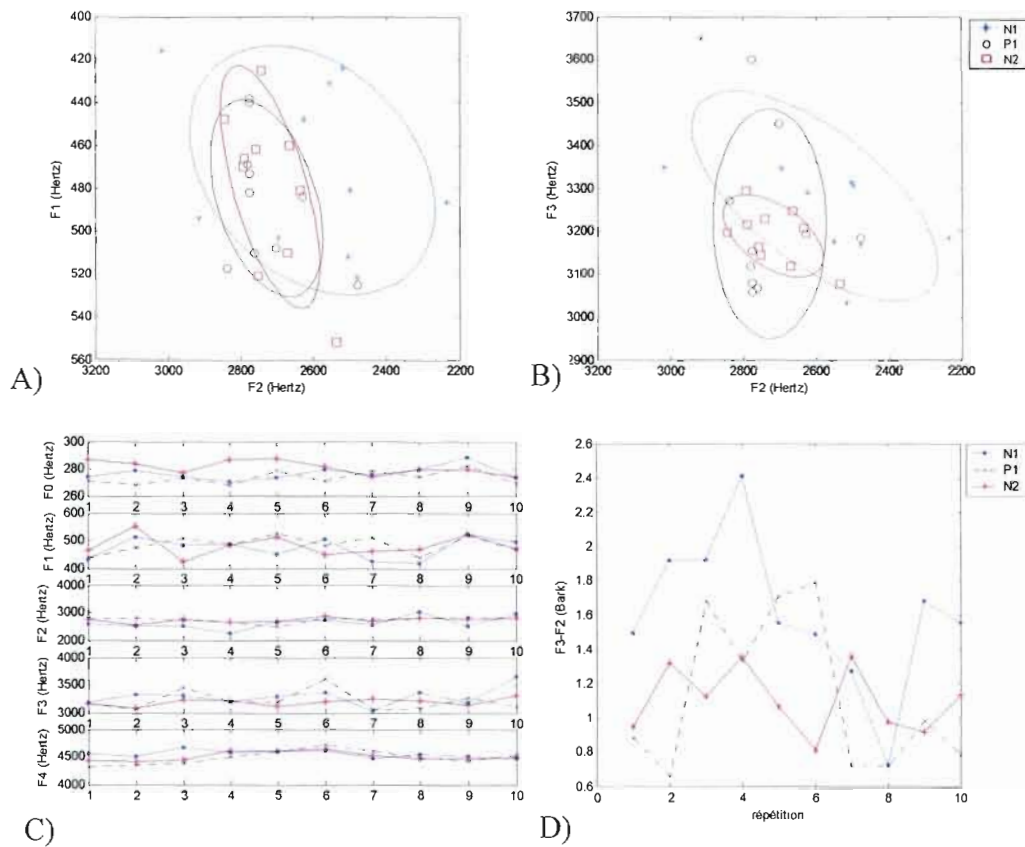


Figure 3.41 Résultats acoustiques pour la voyelle [y] du locuteur LB_e : Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 2 et 3, en Bark.

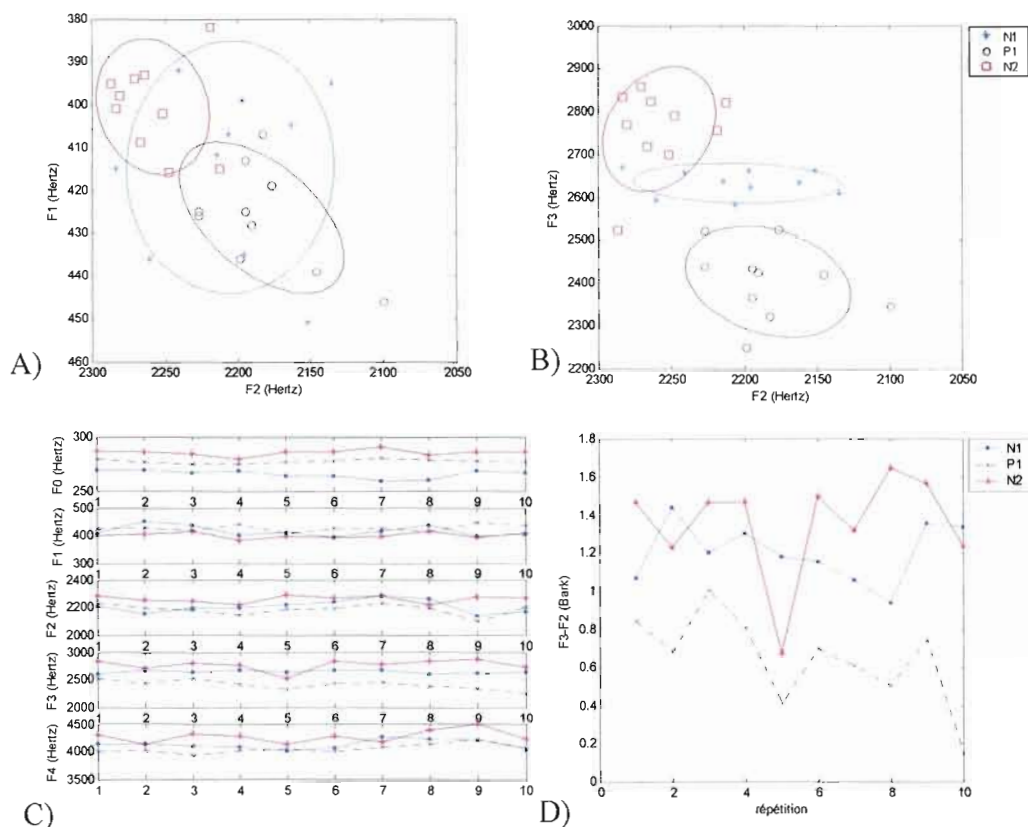


Figure 3.42 Résultats acoustiques pour la voyelle [y] de la locutrice MC_e Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 2 et 3, en Bark.

Pour la voyelle [y], 2 sujets enfants (JC_e et LB_e) ont fait une bonne compensation, résultant en aucune différence majeure entre les valeurs formantiques en condition normale préperturbation et perturbée. Par contre, pour la locutrice BP_e, les trois premiers formants et la fréquence fondamentale montrent d'importantes variations. Cette variation de la fréquence fondamentale se retrouve également chez la locutrice MC_e. Une diminution de la valeur de F3 peut également être observée pour cette locutrice.

Les Figures 3.43 à 3.46 présentent les résultats de la voyelle [u] pour les locuteurs adultes.

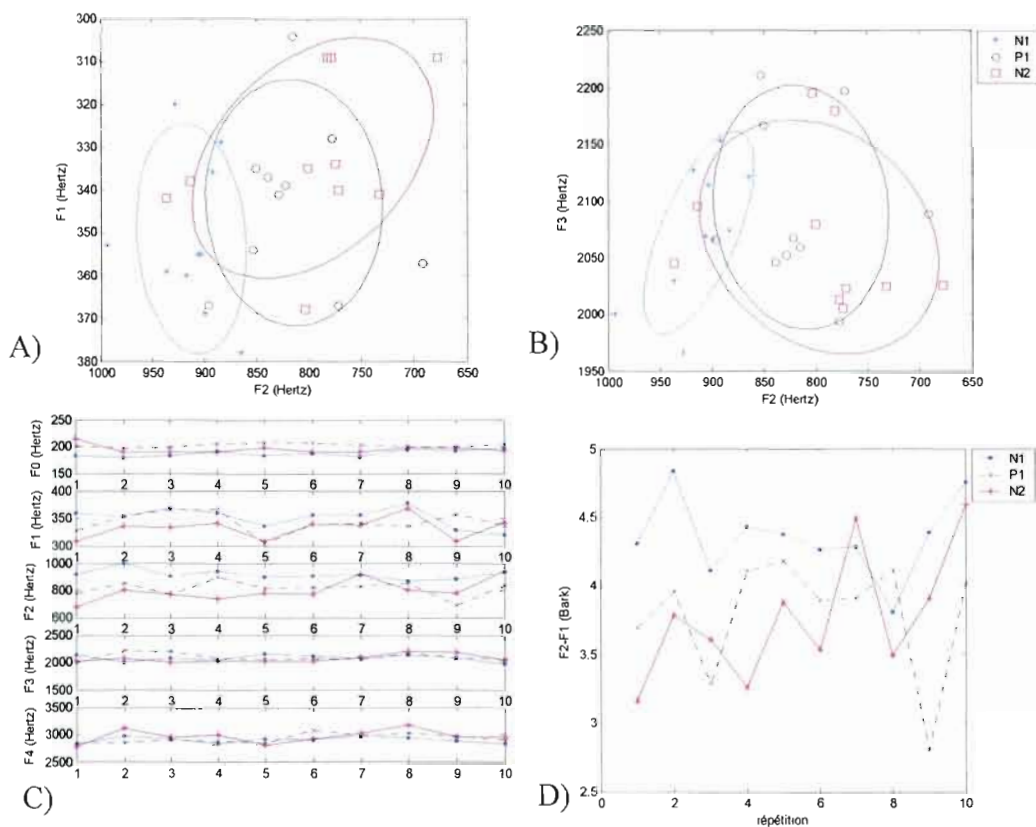


Figure 3.43 Résultats acoustiques pour la voyelle [u] du locuteur AC_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 1 et 2, en Bark.

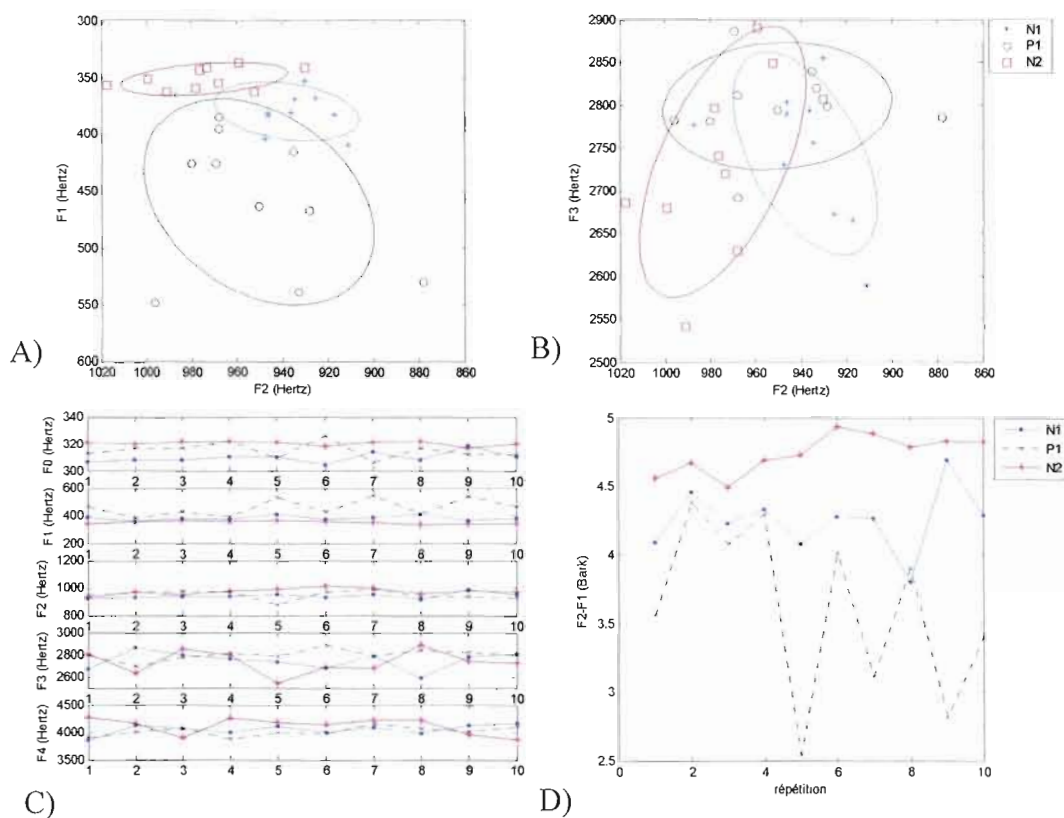


Figure 3.44 Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice AL_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 1 et 2, en Bark.

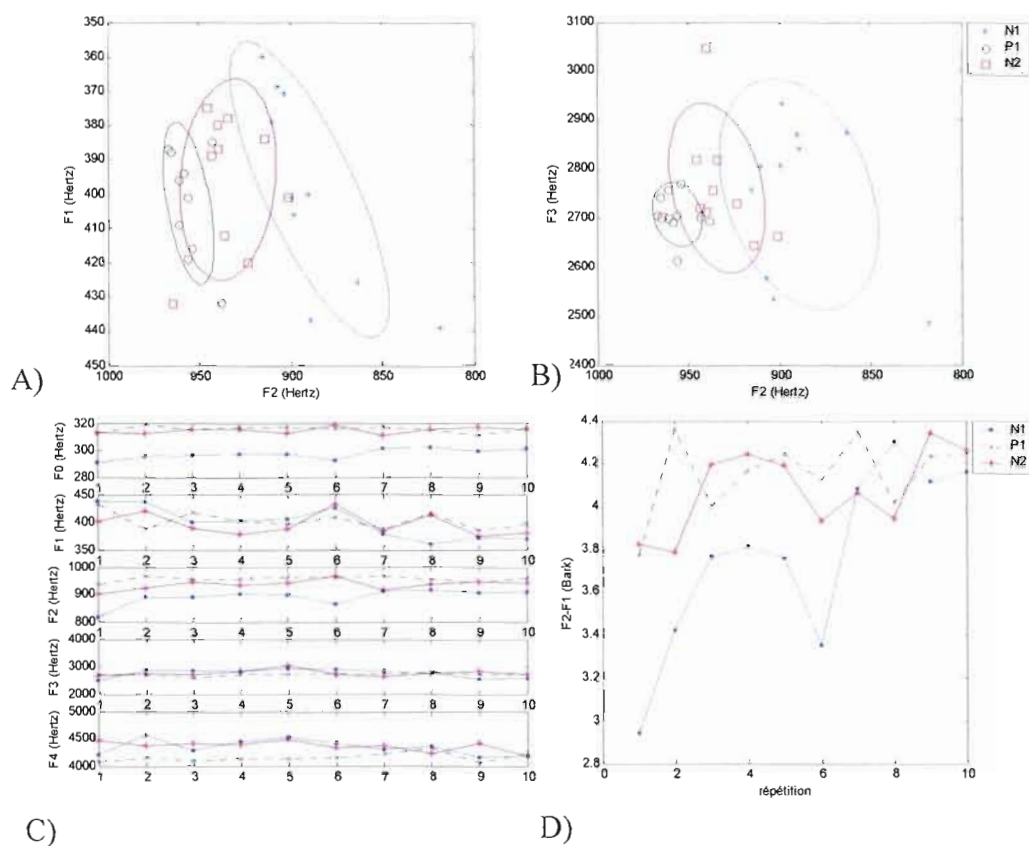


Figure 3.45 Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice JR_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 1 et 2, en Bark.

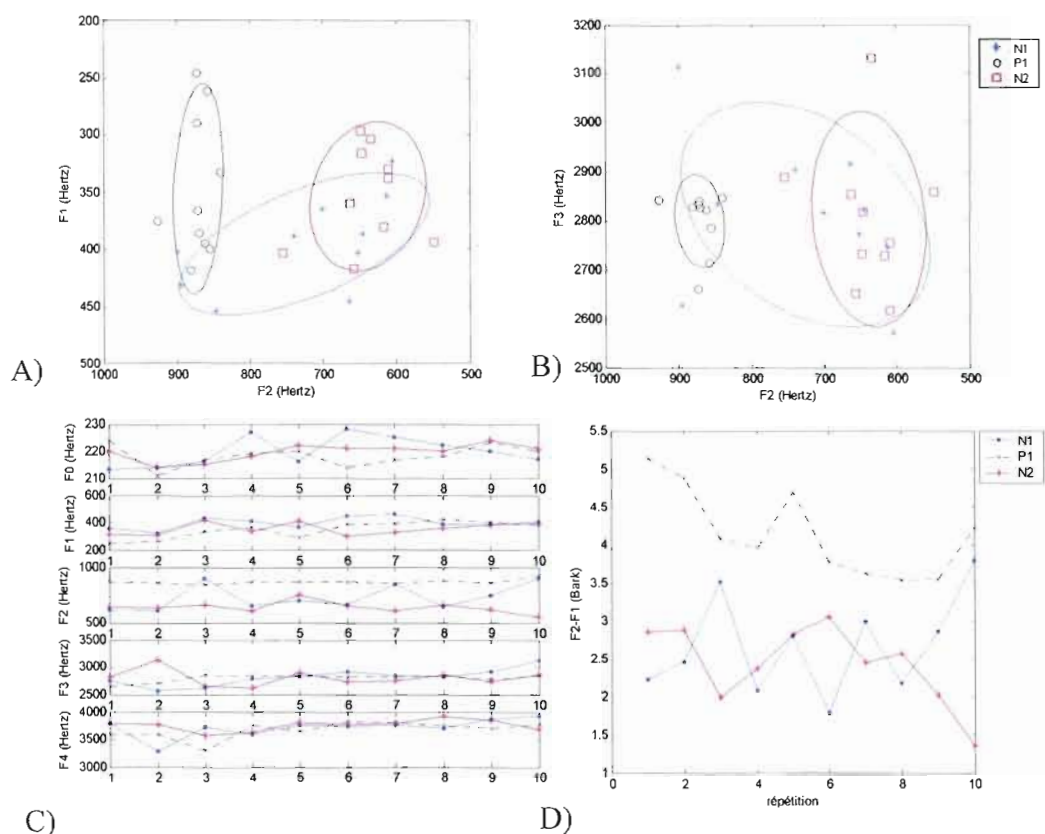


Figure 3.46 Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice MB_a : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 1 et 2, en Bark.

Les changements acoustiques majeurs pour cette voyelle sont une augmentation de la F0 en condition perturbée et une variation de F2. Noter que cette variation ne se fait pas dans le même sens pour tous les locuteurs. Le premier formant a également été affecté chez un des locuteurs (AC_a). Cependant, c'est ce locuteur qui semble avoir le mieux compensé, d'un point de vue de la production, puisque les ellipses de ce locuteur se chevauchent plus que pour les autres sujets, pour qui elles sont assez distantes. Il faut également noter que pour les locutrices JR_a et MB_a, les ellipses en condition perturbée sur le plan F2 vs. F3 sont plus petites que celles des conditions normales.

Les résultats acoustiques des productions des enfants pour la voyelle [u] sont illustrés aux figures 3.47 à 3.50.

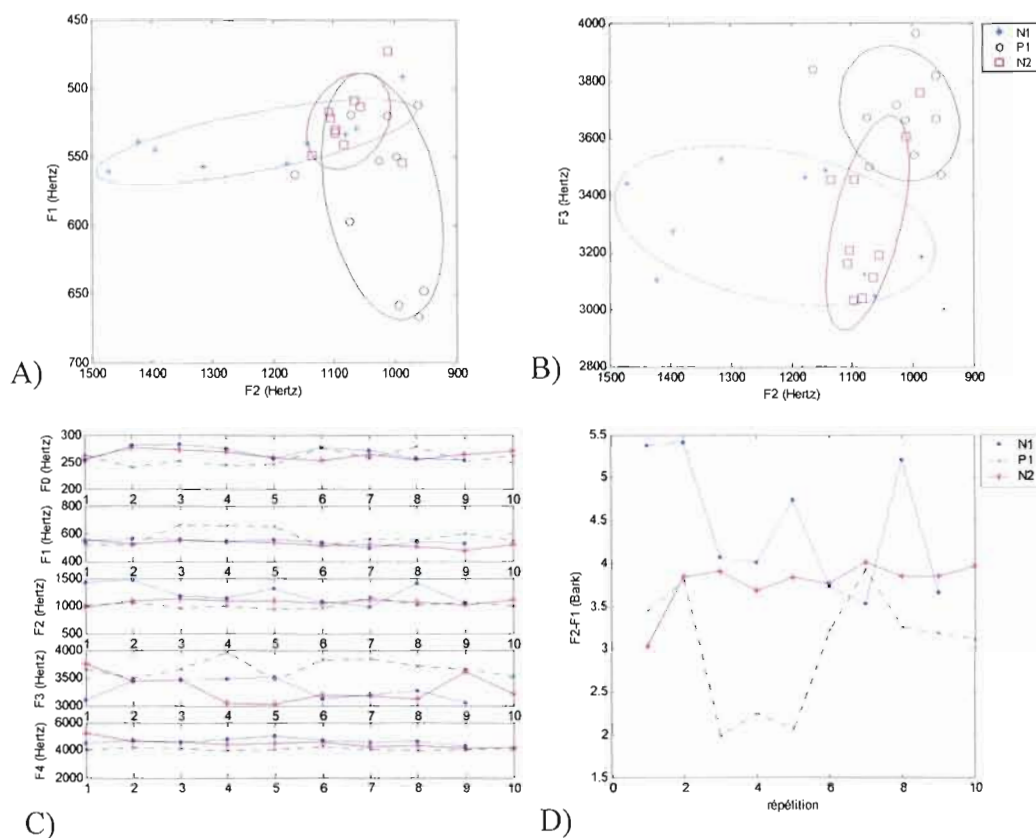


Figure 3.47 Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice BP_e : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 1 et 2, en Bark.

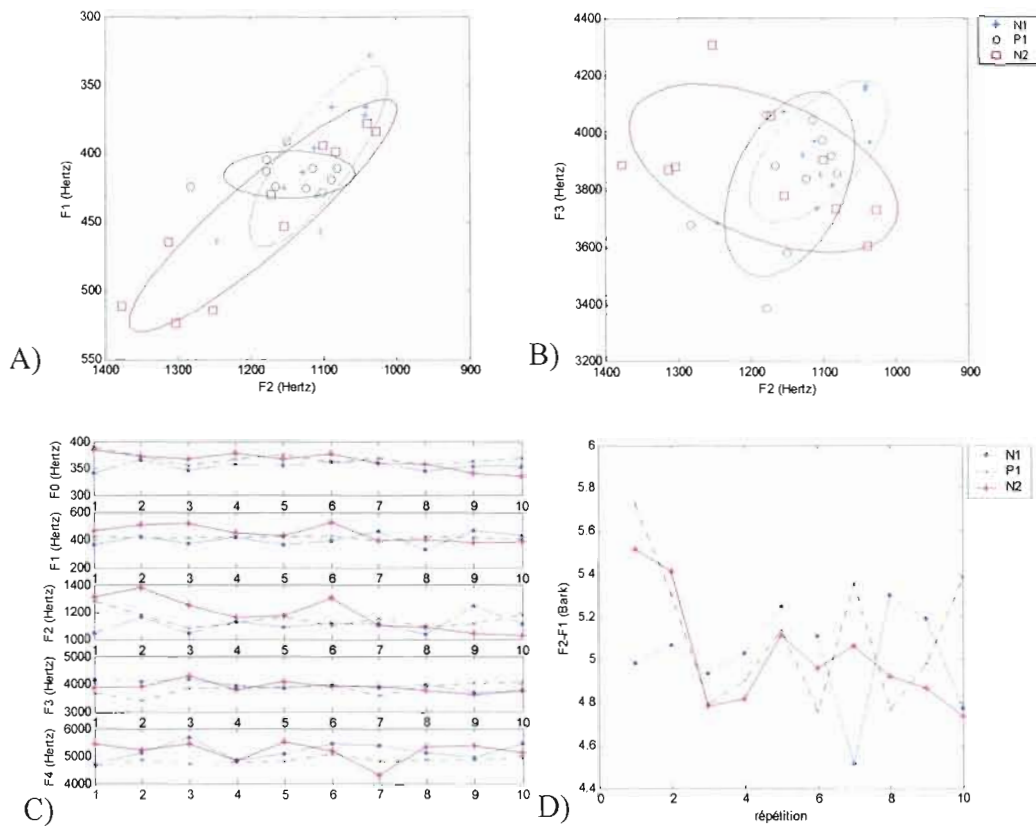


Figure 3.48 Résultats acoustiques pour la voyelle [u] du locuteur JC_e : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 1 et 2, en Bark.

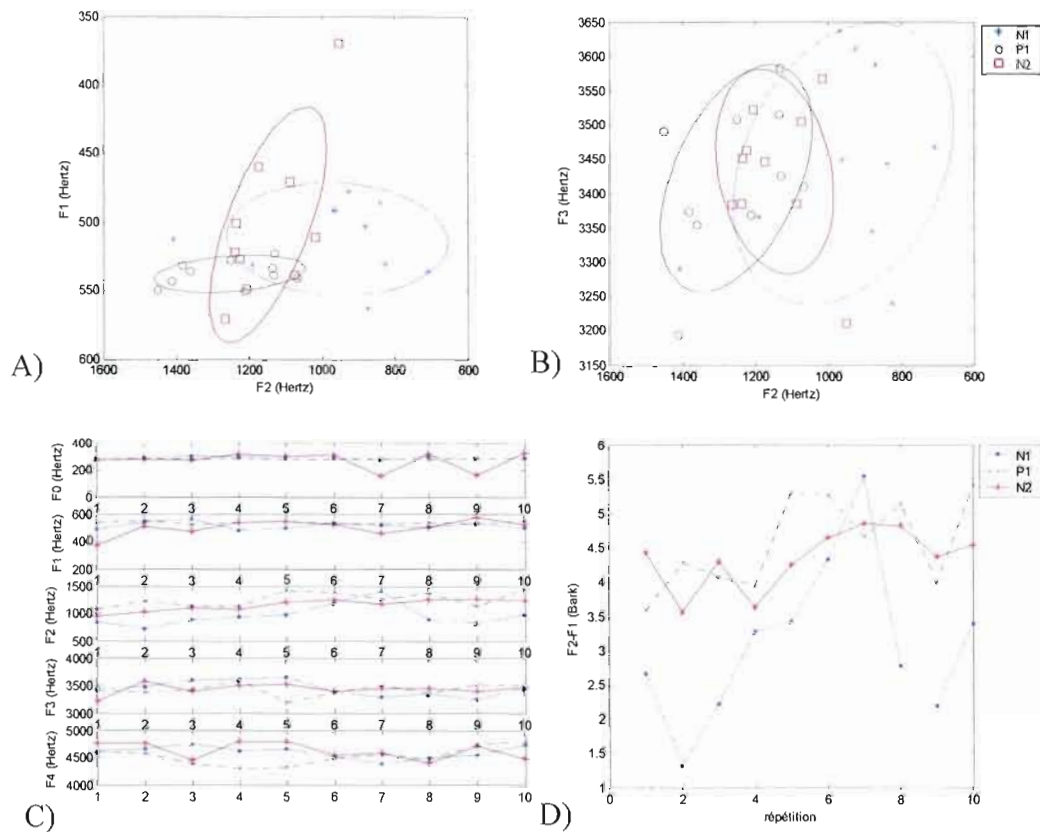


Figure 3.49 Résultats acoustiques pour la voyelle [u] du locuteur LB_e A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 1 et 2, en Bark.

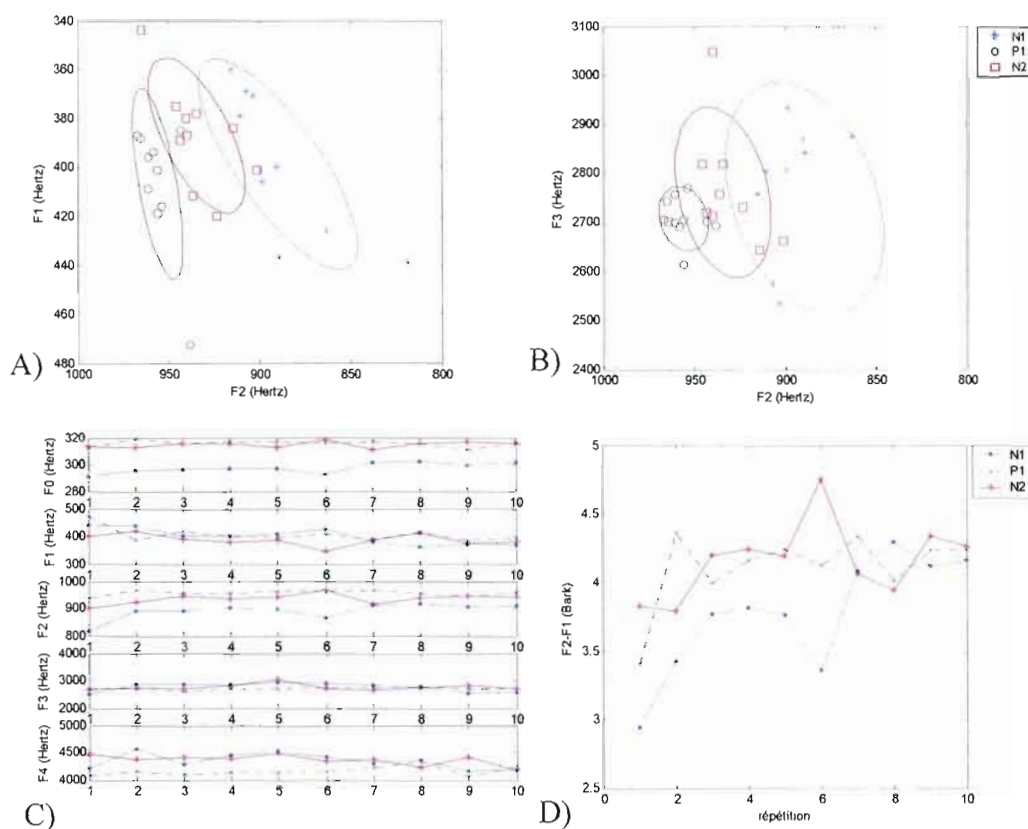


Figure 3.50 Résultats acoustiques pour la voyelle [u] de la locutrice MC_e : A) Ellipses de dispersion sur le plan F1 vs F2, B) Ellipses de dispersion sur le plan F2 vs F3, C) Évolution de la fréquence fondamentale et des formants 1 à 4, D) Différence des formants 1 et 2, en Bark.

Les voyelles des locuteurs BP_e, LB_e et MC_e ont été affectées de façon significative sur les plans F1 vs. F2 et F2 vs. F3, tel que le montrent les ellipses de dispersion. Le locuteur JC_e semble avoir élaboré une stratégie de compensation efficace puisque la superposition des ellipses sur ces plans est importante. Trois sujets (JC_e, LB_e et MC_e) ont modifié leur fréquence fondamentale de manière significative en condition perturbée. Cependant, c'est pour la locutrice BP_e que les différences des formants convergents ont été les plus marquées.

Les tableaux 3.4 à 3.6 résument les effets significatifs de la condition perturbée par rapport à la condition normale préperturbation pour la fréquence fondamentale et les quatre premiers

formants de chaque locuteur. Les détails de l'analyse statistique qui a été faite sont disponibles à l'appendice A.

Tableau 3.4 Différences significatives observées en condition perturbée par rapport aux valeurs de la condition normale préperturbation pour la voyelle [i] (*= $p<0.05$; **= $p<0.01$; ***= $p<0.001$)

Groupe	Sujet	F0	F1	F2	F3	F4
Adultes	AC_a	↑ ***	↓ ***		↓ *	
	AL_a	↓ ***				↑ **
	JR_a	↓ *		↓ **		↓ ***
	MB_a	↑ *			↓ **	
Enfants	BP_e				↓ **	↓ ***
	JC_e	↑ ***				
	LB_e		↑ *	↓ *	↓ **	
	MC_e	↓ *		↓ **		↓ ***

Tableau 3.5 Différences significatives observées en condition perturbée par rapport aux valeurs de la condition normale préperturbation pour la voyelle [y] (*= $p<0.05$; **= $p<0.01$; ***= $p<0.001$)

Groupe	Sujet	F0	F1	F2	F3	F4
Adultes	AC_a				↑ *	
	AL_a		↑ **		↑ ***	
	JR_a	↑ ***			↓ ***	
	MB_a	↑ *		↑ ***		
Enfants	BP_e	↑ ***	↑ **	↓ ***	↓ **	
	JC_e					
	LB_e					
	MC_e	↑ ***			↓ ***	

Tableau 3.6 Différences significatives observées en condition perturbée par rapport aux valeurs de la condition normale préperturbation pour la voyelle [u] (*= $p<0.05$; **= $p<0.01$; ***= $p<0.001$)

Groupe	Sujet	F0	F1	F2	F3	F4
Adultes	AC_a	↑ ***		↓ ***		
	AL_a	↑ *	↑ **			
	JR_a	↑ ***		↑ ***		↓ **
	MB_a			↑ **		
Enfants	BP_e				↑ *	↓ ***
	JC_e	↑ **				↓ **
	LB_e	↓ *	↓ *	↑ **		
	MC_e	↑ ***		↑ ***		↓ **

Il est possible de voir dans ces tableaux que le paramètre le plus affecté par les perturbations a été la fréquence fondamentale. Cependant, la direction du changement acoustique subi par ce paramètre n'a pas été la même pour chaque voyelle. Toutes voyelles réunies, cette différence n'a pas évolué dans le même sens chez un même locuteur. Pour la voyelle [i], ce sont F3 et F4 qui ont subi le plus de variations, tandis que pour [y], les valeurs du quatrième formant n'ont pas été significativement différentes, contrairement à ce qui est observé pour le troisième formant, puisque c'est ce dernier qui a le plus varié. Pour la voyelle [u], les changements acoustiques se sont produits surtout au niveau de F2, avec tout de même des différences marquées en F4.

3.2.2 Résultats des données articulatoires

Après avoir étudié les productions sur le plan acoustique, celles-ci seront étudiées sur le plan articulatoire à l'aide de la méthode présentée plus tôt dans ce chapitre. Cependant, un bref rappel des éléments analysés s'impose afin de mieux cerner les différences observables.

Quatre éléments serviront à analyser la variation articulatoire des voyelles produites, à savoir le point maximal (en hauteur) de la langue (Y_MAX), l'emplacement en abscisse de ce point (X_DE_Y_MAX), le degré de courbure de la langue (COURBURE) et la position de cette

courbure sur la surface de la langue (POS_COURBURE). Les éléments reliés au point maximal serviront réunies pour faire une caractérisation de la langue étroitement liée à sa position, tandis que les éléments reliés à la courbure caractériseront la forme de la langue.

Avant de présenter les résultats pour chaque voyelle, une représentation des espaces acoustiques de chaque locuteur pour les conditions normales pré et postperturbation sera présentée. Sur ces Figures (3.50 à 3.57), la taille des ellipses est importante puisque celle-ci décrit la variabilité articulatoire de chaque voyelle. La superposition des ellipses est également un indice important qui déterminera la proximité de la position d'une voyelle par rapport à une autre voyelle ou alors les ressemblances entre ces voyelles au plan de la forme de la langue. Il faut également se rappeler que les contours de langue qui ont servi à l'extraction de ces éléments étaient orientés avec l'apex à droite. Aussi, les ellipses de la voyelle [a] sont les mêmes dans les deux conditions, puisque cette voyelle n'est présente que pour faciliter la représentation des espaces articulatoires.

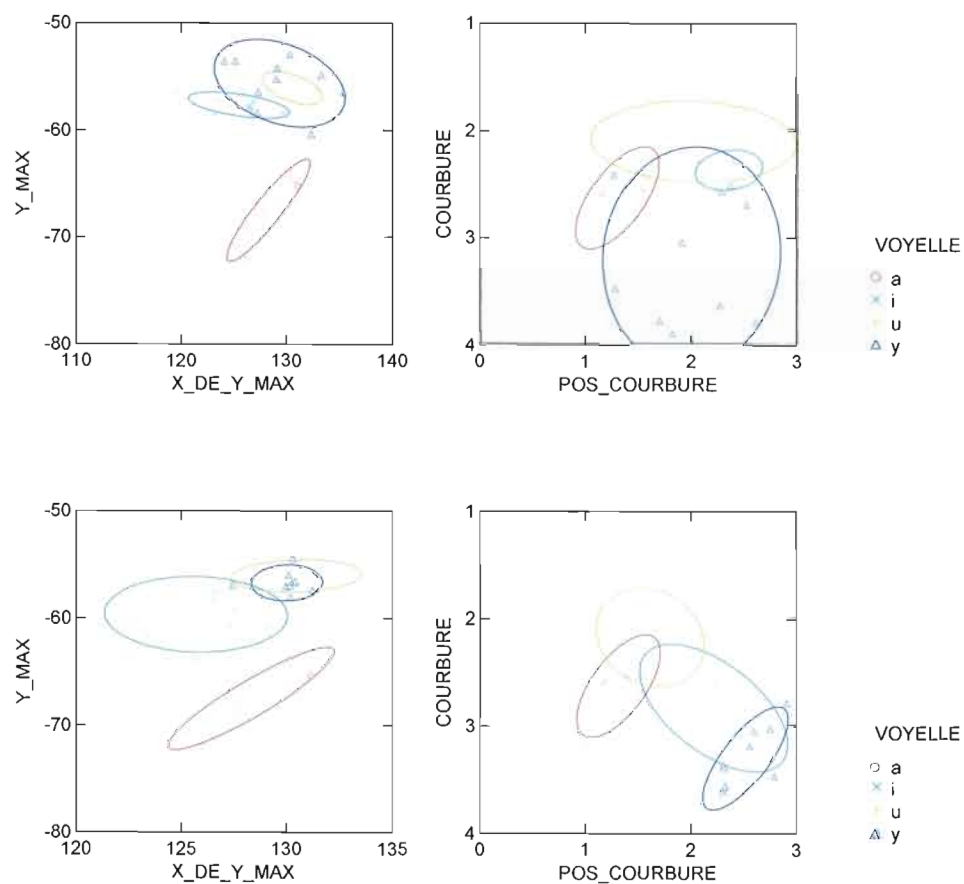


Figure 3.51 Espace articulatoire du locuteur AC_a, en condition normale pré-perturbation (haut) et normale post-perturbation (bas).

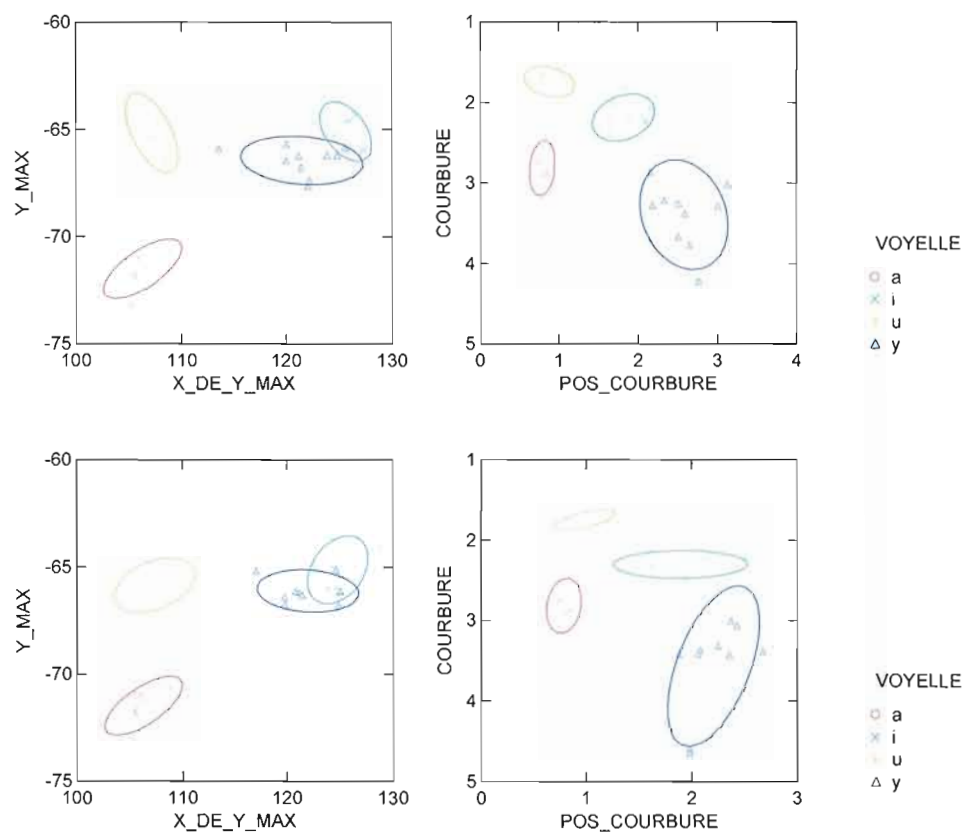


Figure 3.52 Espace articulaire du locuteur AL_a, en condition normale préperturbation (haut) et normale postperturbation (bas).

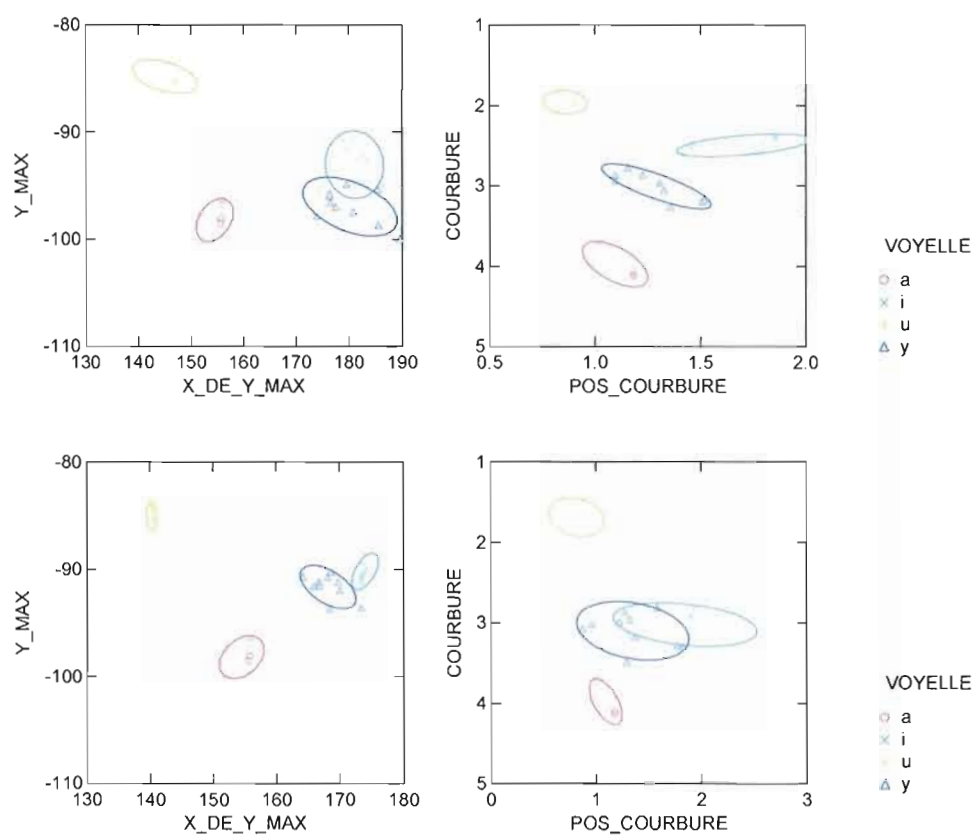


Figure 3.53 Espace articulatoire du locuteur JR_a, en condition normale préperturbation (haut) et normale postperturbation (bas).

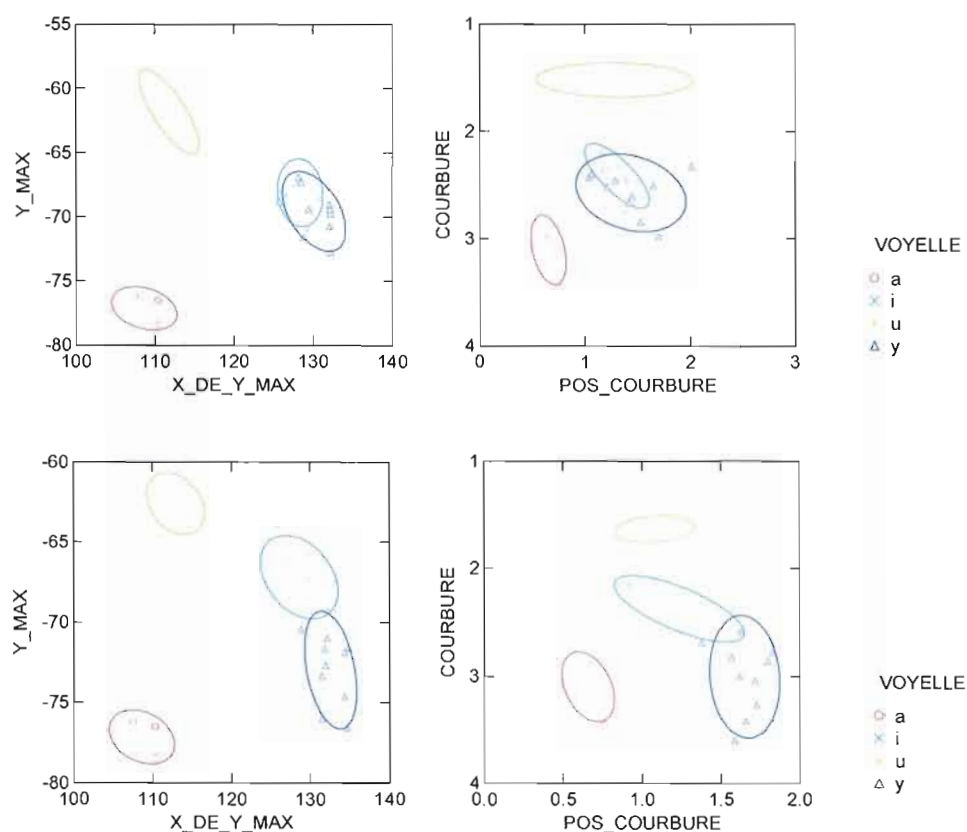


Figure 3.54 Espace articulatoire du locuteur MB_a, en condition normale préperturbation (haut) et normale postperturbation (bas).

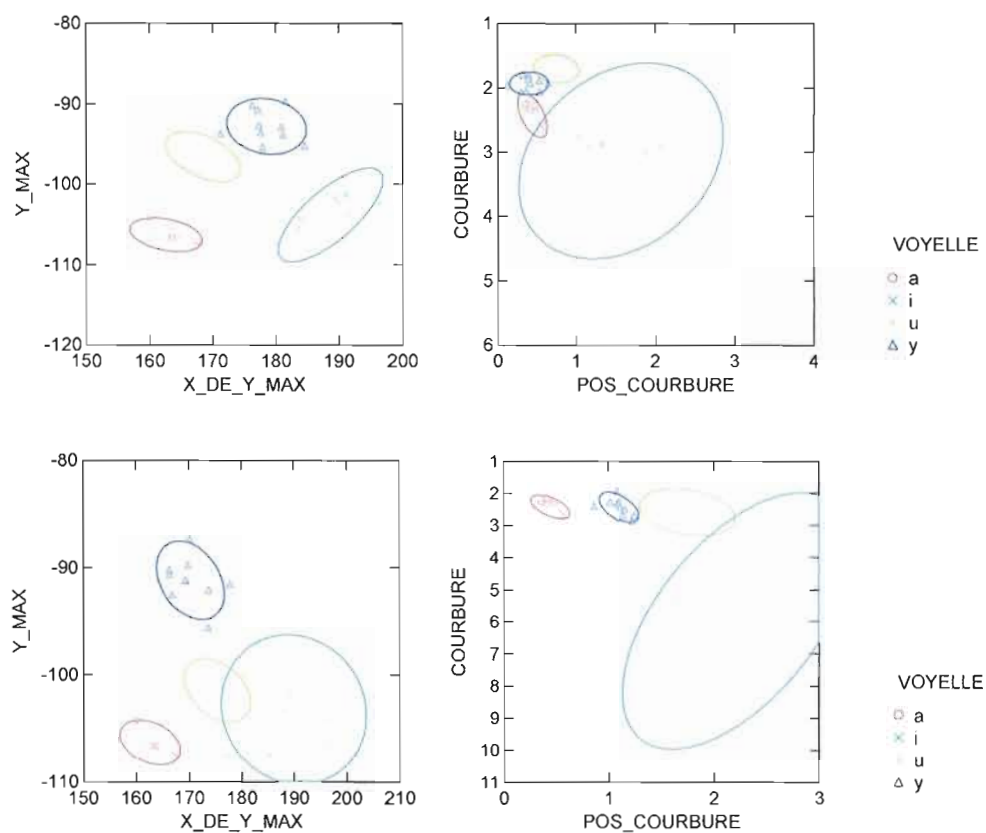


Figure 3.55 Espace articulatoire du locuteur BP_e, en condition normale préperturbation (haut) et normale postperturbation (bas).

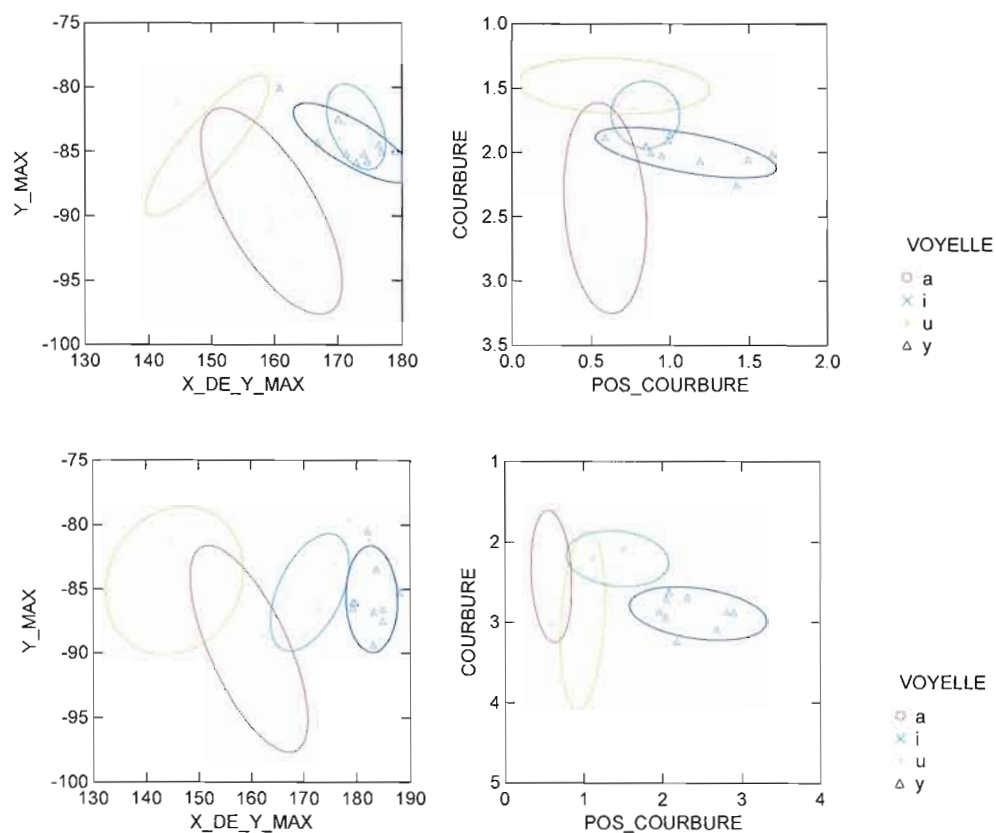


Figure 3.56 Espace articulatoire du locuteur JC_e, en condition normale préperturbation (haut) et normale postperturbation (bas).

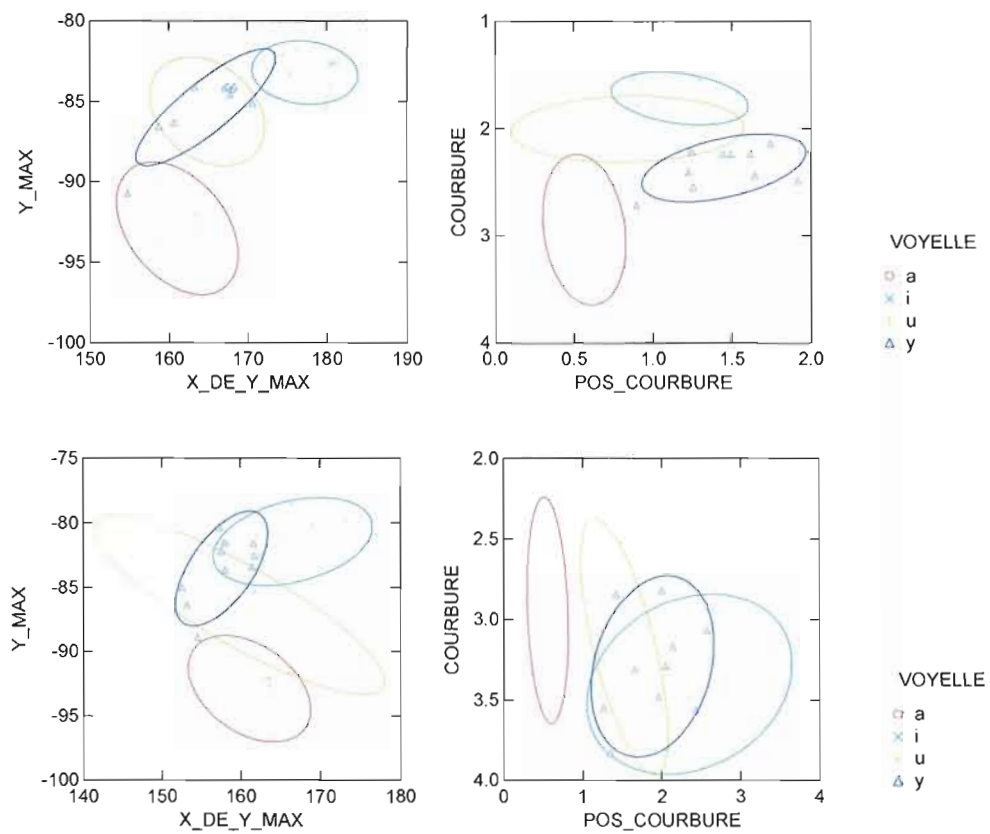


Figure 3.57 Espace articulatoire du locuteur LB_e, en condition normale pré-perturbation (haut) et normale post-perturbation (bas).

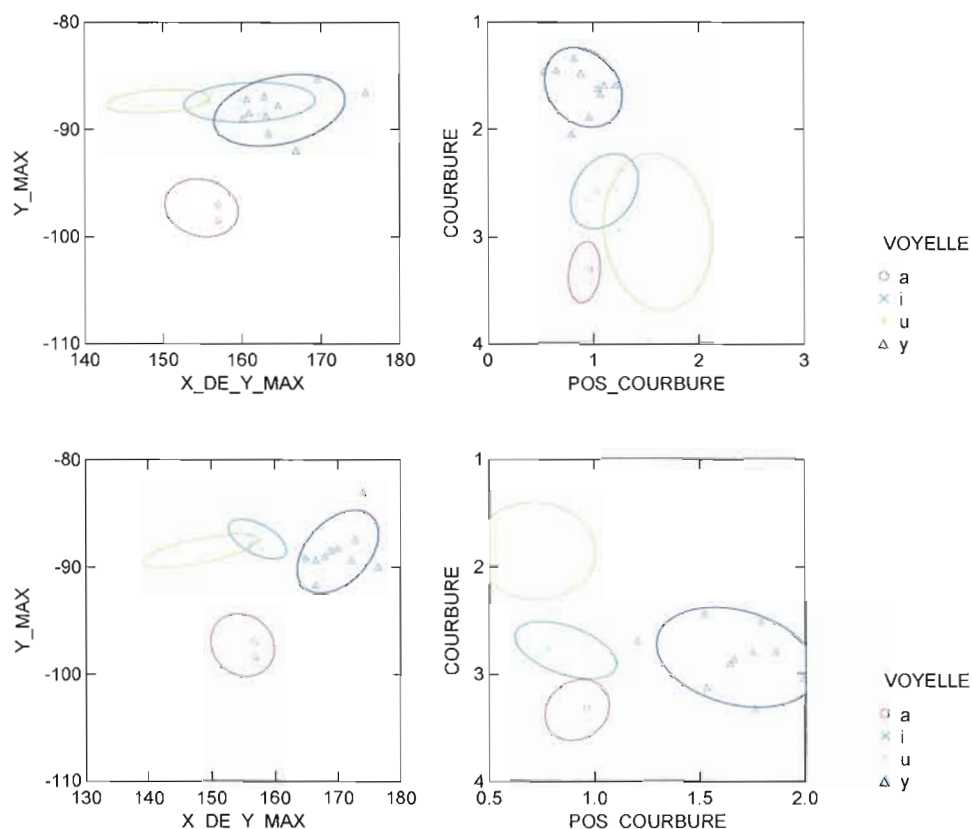


Figure 3.58 Espace articulatoire du locuteur MC_e, en condition normale préperturbation (haut) et normale postperturbation (bas).

Les tailles des ellipses illustrent à quel point les espaces articulatoires des enfants sont plus variables que ceux des adultes. Le locuteur AC_a fait peut-être exception à cette règle. Le cas de ce locuteur sera discuté ultérieurement. Le fait que des différences marquées entre [i] et [y] soient présentes, tant au plan de la position que de la forme, peut paraître surprenant, puisque la configuration de la langue pour ces voyelles ne devrait théoriquement pas être très différente. Toujours en regard de ces deux voyelles, il est intéressant de constater à quel point la variabilité de la voyelle [i] est supérieure à celle de la voyelle [a] pour la locutrice BP_e. On peut également observer un effet postperturbation par rapport à la position des ellipses des voyelles [i] et [y] chez plusieurs locuteurs.

Les figures représentant chaque voyelle dans chaque condition pour chaque locuteur vont maintenant être présentés, en débutant par la voyelle [i] pour les locuteurs adultes (figures 3.59 à 3.62)

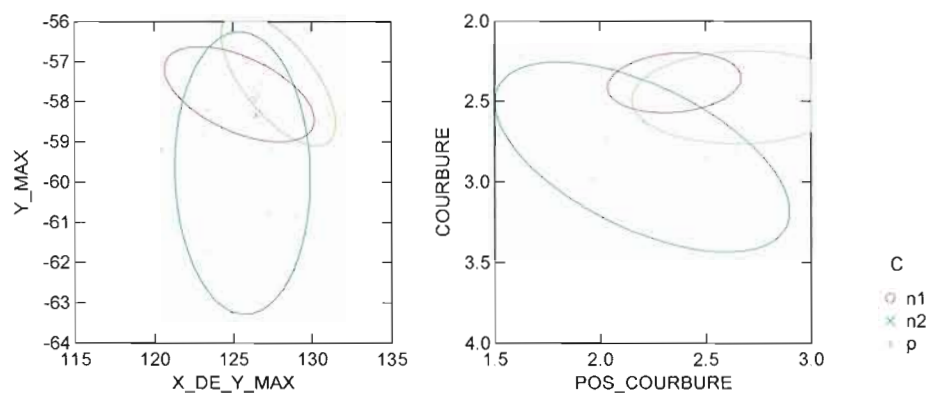


Figure 3.59 Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur AC_a.

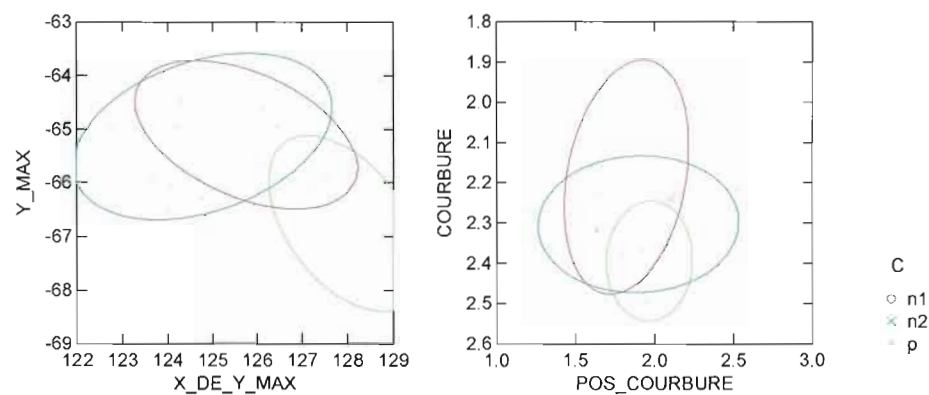


Figure 3.60 Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locutrice AL_a.

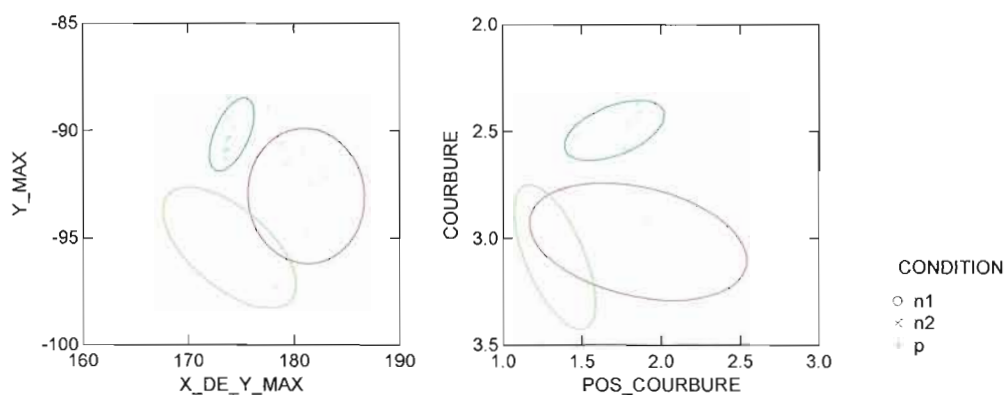


Figure 3.61 Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur JR_a.

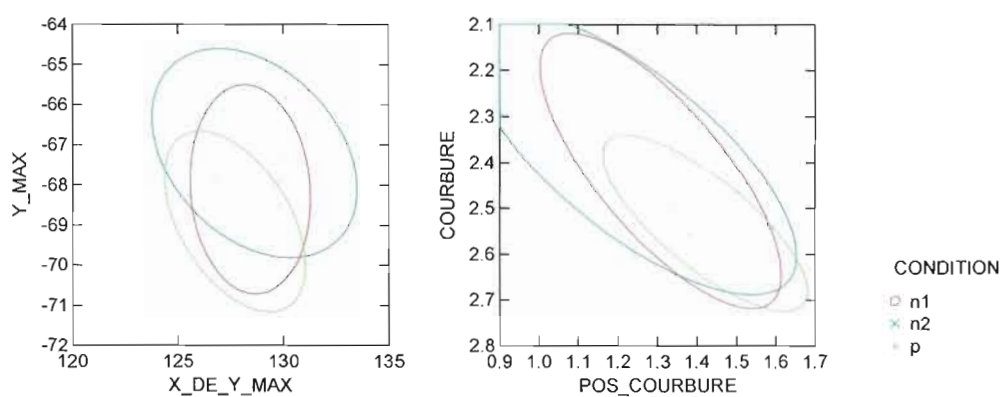


Figure 3.62 Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur MB_a.

C'est chez les locuteurs JR_a et AC_a que la forme et la position ont été les plus affectées en condition perturbée. Pour AC_a, un avancement du point maximal est observé, contrairement à un recul chez JR_a. On constate aussi une diminution de la courbure pour AC_a et un recul de la position de celle-ci chez JR_a.

Les figures 3.63 à 3.66 illustrent les caractéristiques articulatoires des locuteurs enfants pour la voyelle [i]

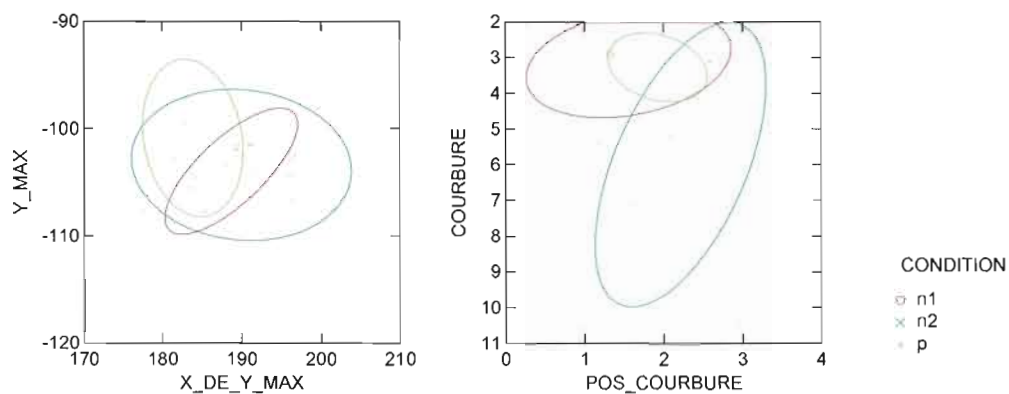


Figure 3.63 Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur BP_e.

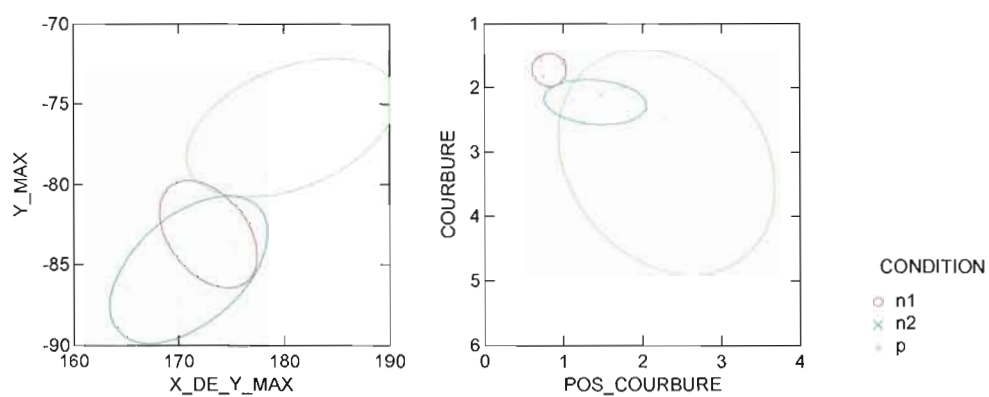


Figure 3.64 Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur JC_e.

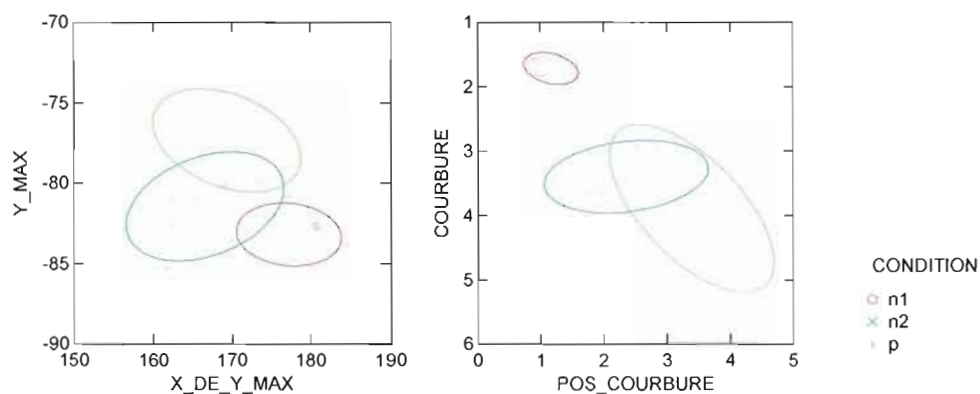


Figure 3.65 Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur LB_e.

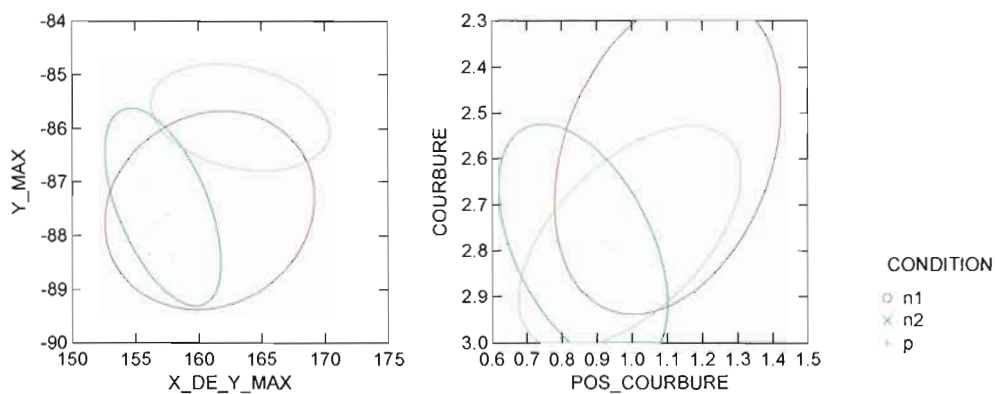


Figure 3.66 Positions et formes de la langue pour la voyelle [i], locuteur MC_e.

Les sujets JC_e et LB_e sont ceux pour qui la perturbation a eu le plus d'impact. La courbure de la langue a été moins importante en condition perturbée, et la position de celle-ci était plus antérieure. Un effet postperturbation peut également être observé pour cette voyelle chez ces locuteurs.

Les figures 3.67 à 3.70 illustrent les caractéristiques articulatoires des locuteurs adultes pour la voyelle [y].

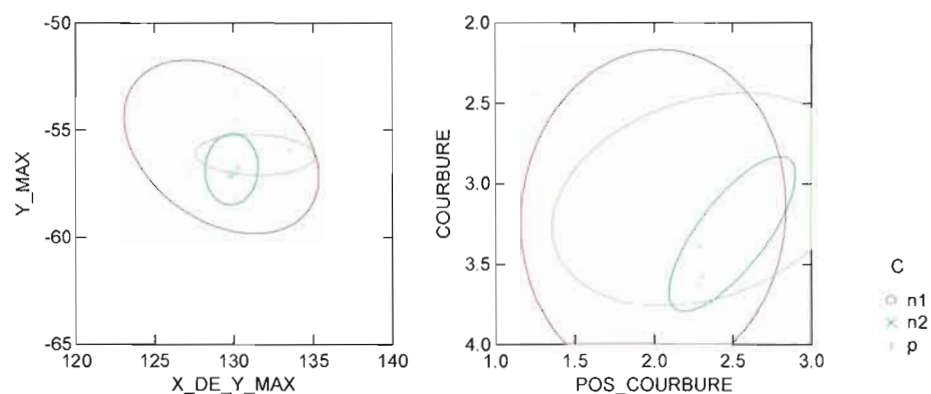


Figure 3.67 Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locuteur AC_a.

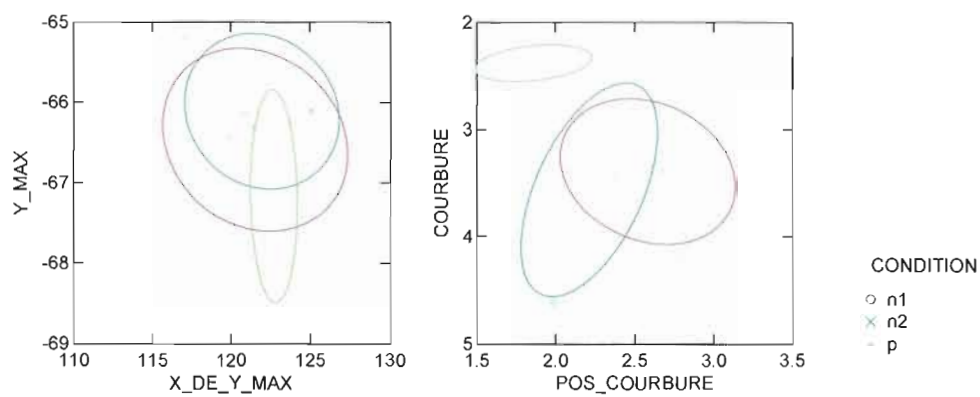


Figure 3.68 Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice AL_a.

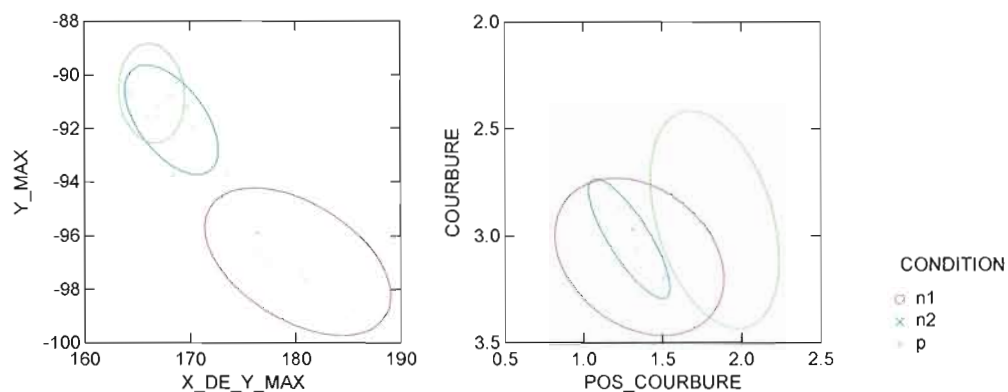


Figure 3.69 Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice JR_a.

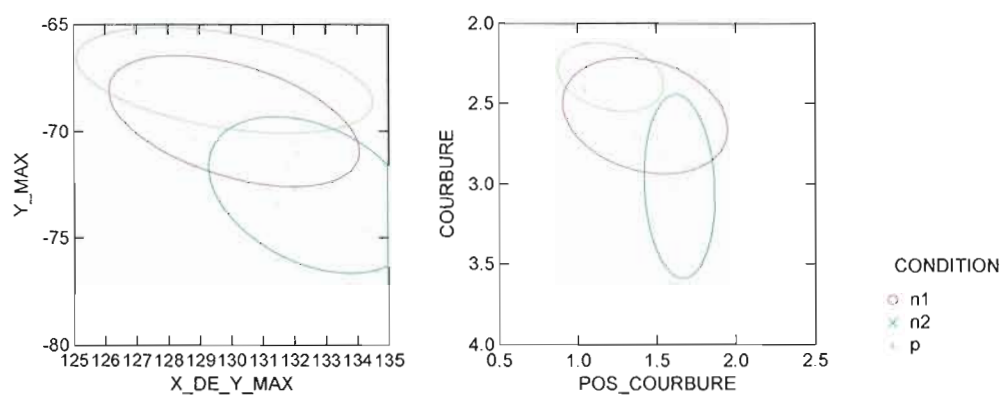


Figure 3.70 Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice MB_a.

La superposition des ellipses indique des compensations importantes chez les locuteurs AC_a, AL_a et MB_a. Les productions de la locutrice JR_a sont celles qui ont été les plus affectées par la perturbation, tant au plan de la forme que de la position du point maximal.

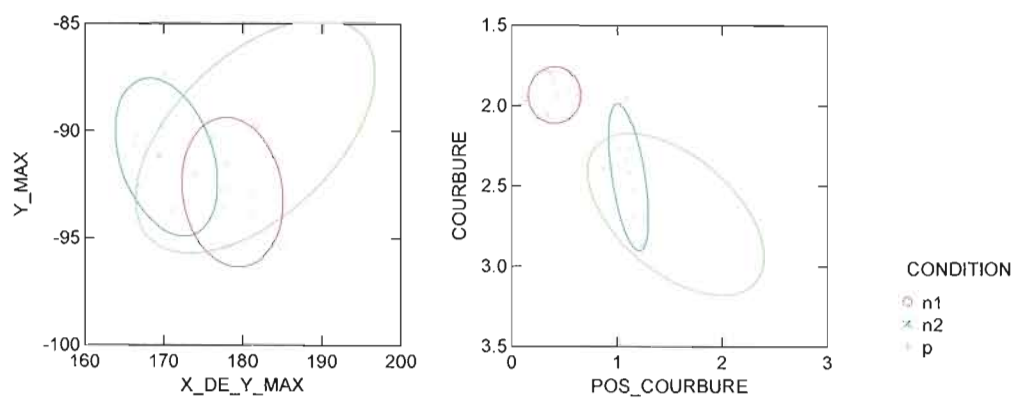


Figure 3.71 Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice BP_e.

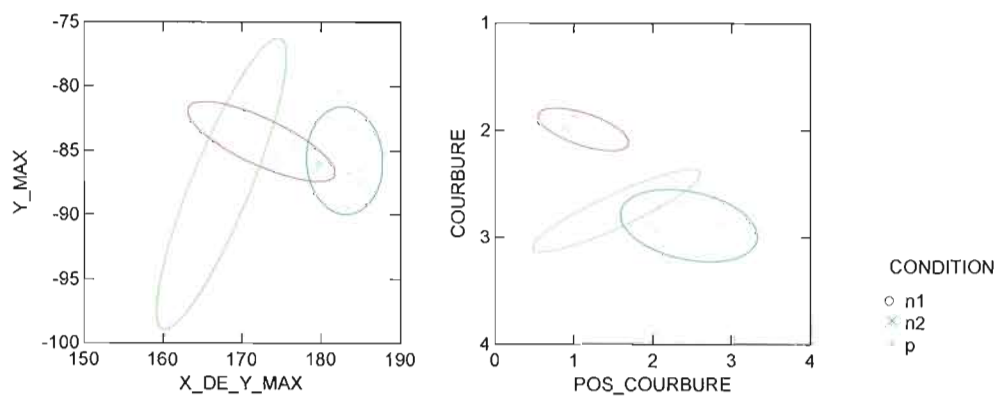


Figure 3.72 Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locuteur JC_e.

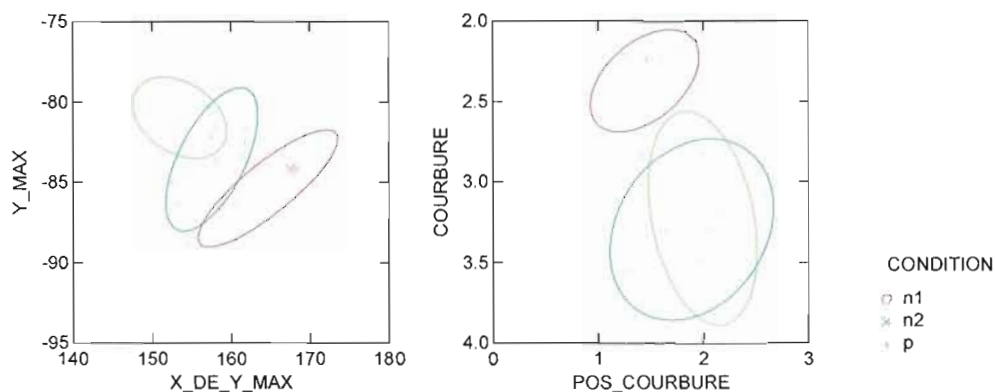


Figure 3.73 Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locuteur LB_e.

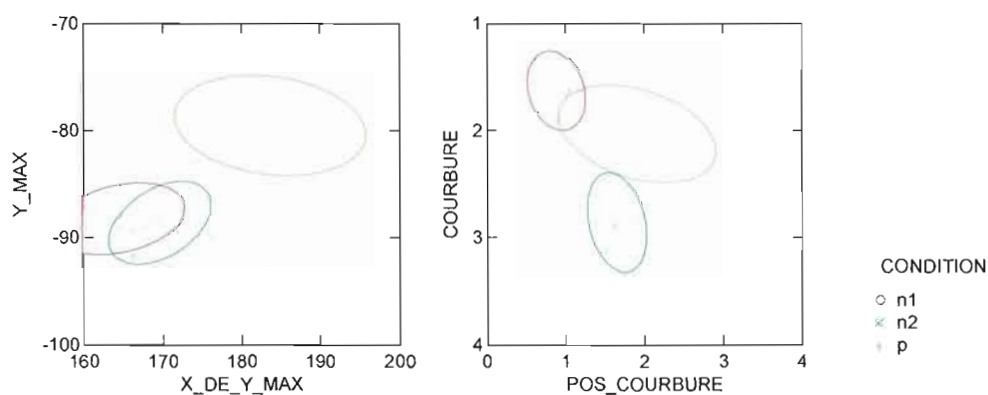


Figure 3.74 Positions et formes de la langue pour la voyelle [y], locutrice MC_e.

Chez les enfants, la forme et la position de la langue ont subi des variations significatives pour tous les sujets. Les figures 3.75 à 3.78 illustrent les changements articulatoires observés pour la voyelle [u] chez les adultes.

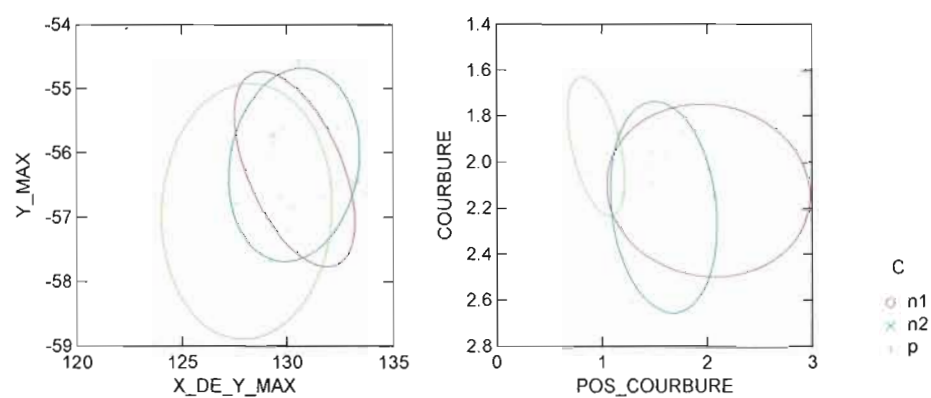


Figure 3.75 Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locuteur AC_a.

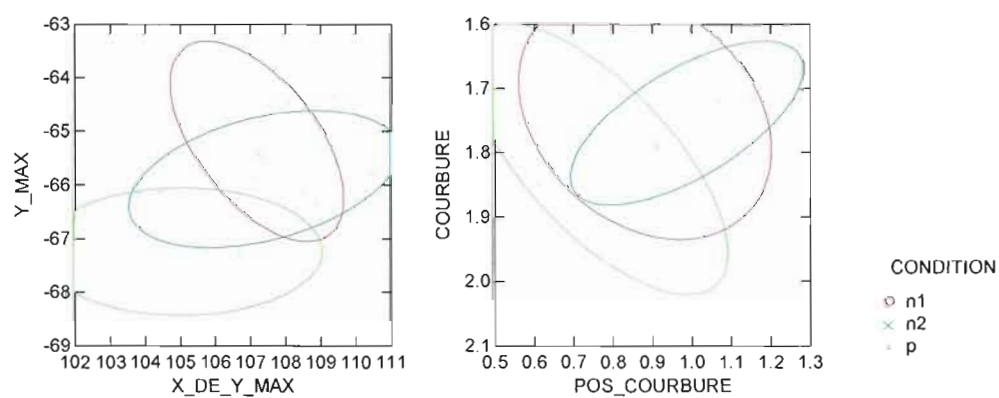


Figure 3.76 Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice AL_a.

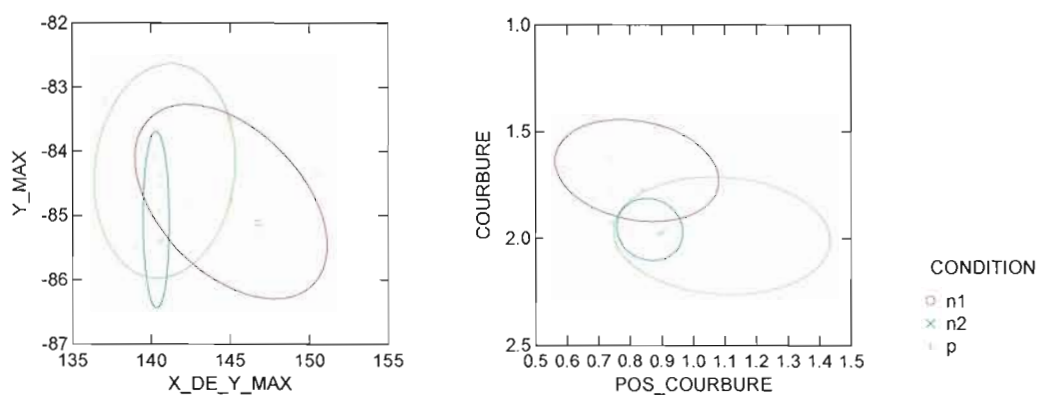


Figure 3.77 Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice JR_a.

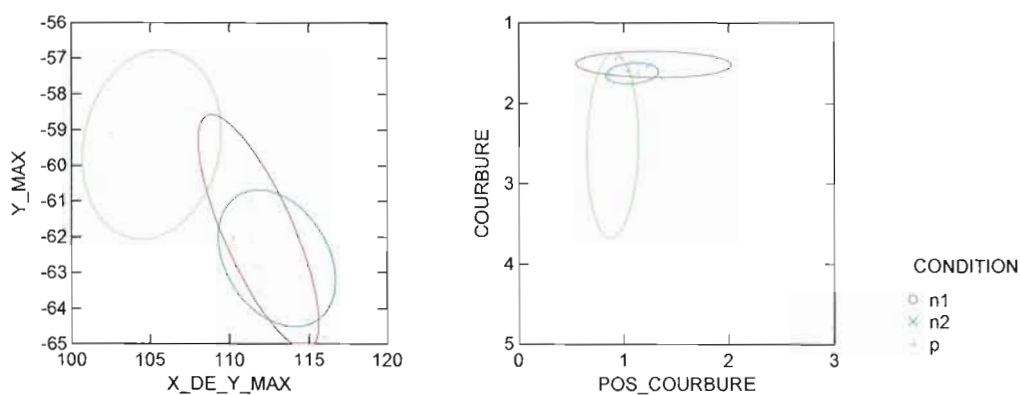


Figure 3.78 Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice MB_a.

Pour les locuteurs AC_a et JR_a, la position du point maximal n'a pas été influencée par la perturbation. Cependant, pour tous les locuteurs sauf AL_a, un changement significatif a été observé pour la courbure et la position de la courbure.

Les figures 3.79 à 3.82 représentent les valeurs articulatoires des locuteurs enfants pour la voyelle [u].

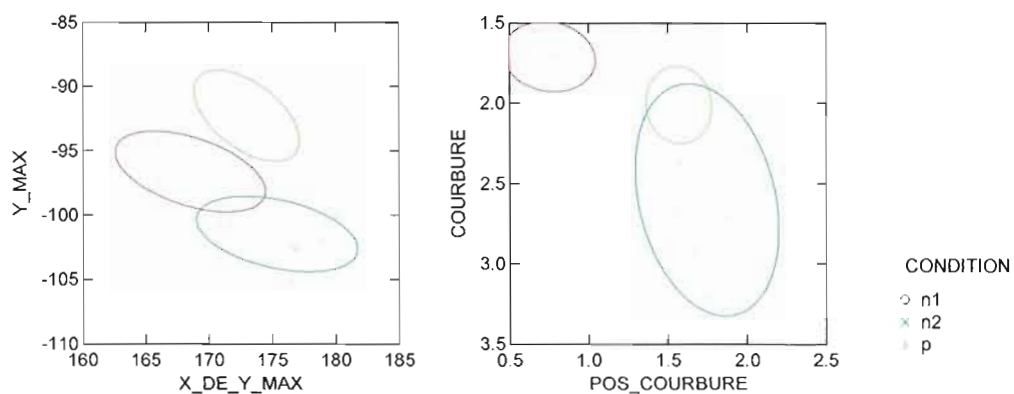


Figure 3.79 Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice BP_e.

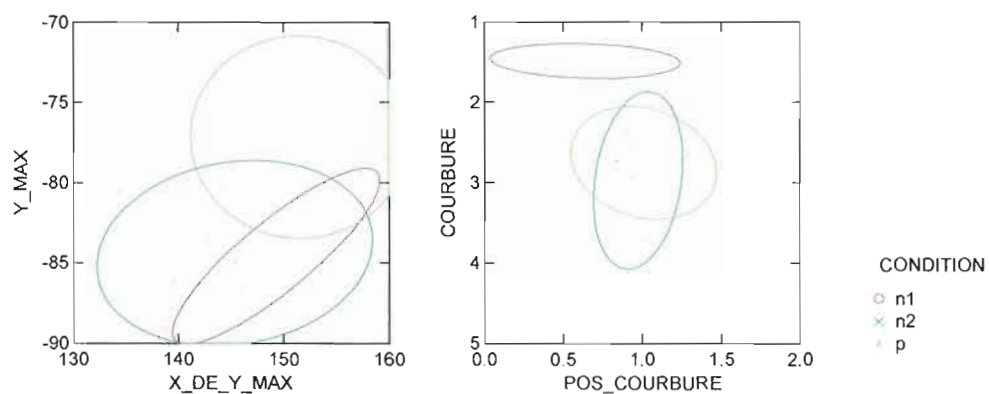


Figure 3.80 Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locuteur JC_e.

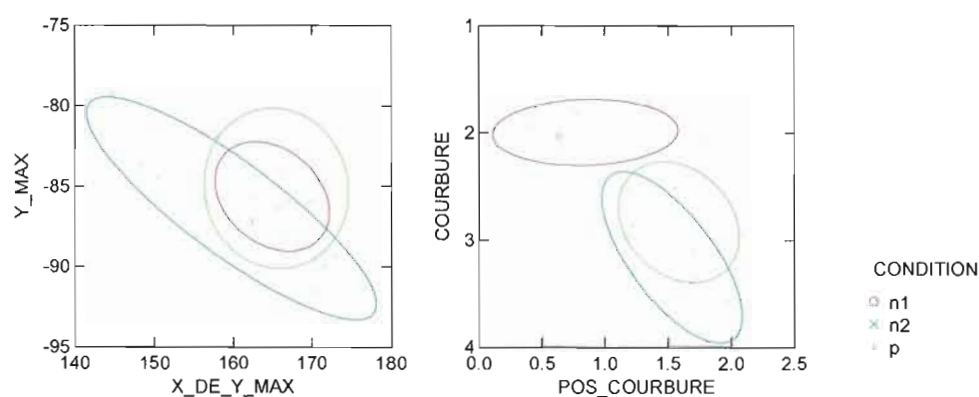


Figure 3.81 Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locuteur LB_e.

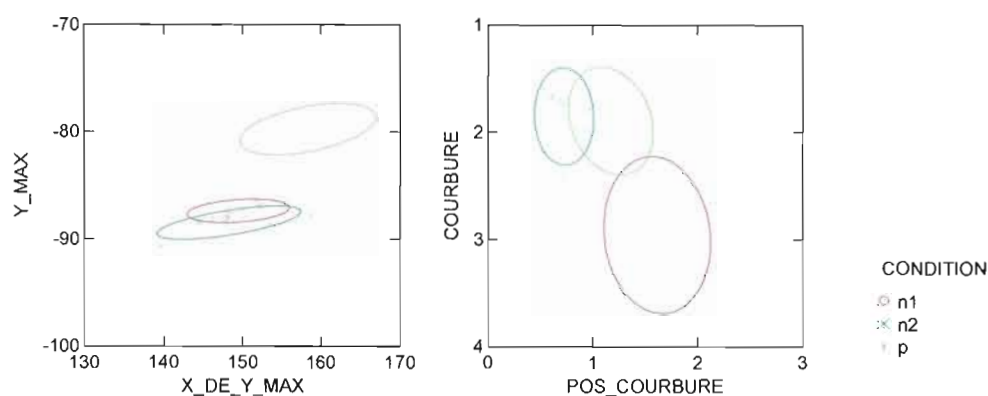


Figure 3.82 Positions et formes de la langue pour la voyelle [u], locutrice MC_e.

Pour les locuteurs enfants, toutes les productions ont subi des changements significatifs sur le plan de la forme, tandis que les productions de deux locuteurs seulement (JC_e et MC_e) ont été affectées de façon significative par les perturbations.

Les tableaux 3.7 à 3.9 présentent les effets significatifs des valeurs en condition perturbée par rapport à la condition normale préperturbation pour les voyelles [i], [y] et [u]. Les résultats statistiques des effets entre les autres conditions sont disponibles en annexe, à l'appendice A.

Tableau 3.6 Effet de la condition de production (p vs n1) sur les paramètres articulatoires pour la voyelle [i] (*= $p<0.05$; **= $p<0.01$; ***= $p<0.001$)

Locuteur	Y max	X de Y max	Courbure	Position
AC_a		→ *		→ *
AL_a	↓ **	→ **	↑ *	
JR_a	↓ **	← ***		← **
MB_a				
BP_e		← *		
JC_e	↑ ***	→ **	↓ **	→ ***
LB_e	↑ ***	← **	↓ ***	→ ***
MC_e	↓ ***		↓ *	

Tableau 3.7 Effet de la condition de production (p vs n1) sur les paramètres articulatoires pour la voyelle [y] (*= $p<0.05$; **= $p<0.01$; ***= $p<0.001$)

Locuteur	Y max	X de Y max	Courbure	Position
AC_a				
AL_a	↓ *		↑ ***	→ ***
JR_a	↑ **	← *		→ **
MB_a				
BP_e			↓ ***	→ ***
JC_e		← *	↓ ***	
LB_e	↓ ***	→ ***	↓ ***	→ **
MC_e	↑ ***	→ ***	↓ **	→ ***

Tableau 3.8 Effet de la condition de production (p vs n1) sur les paramètres articulatoires pour la voyelle [u] (*= $p<0.05$; **= $p<0.01$; ***= $p<0.001$)

Locuteur	Y max	X de Y max	Courbure	Position
AC_a			↑ *	← ***
AL_a	↓ ***			
JR_a			↓ ***	→ **
MB_a	↓ **	→ ***	↓ ***	← *
BP_e	↑ ***	→ **	↓ ***	→ ***
JC_e	↑ ***		↓ ***	→ *
LB_e			↓ ***	→ ***
MC_e	↑ ***	→ ***	↑ ***	← **

Ces tableaux montrent que la forme de la langue a été plus influencée par la perturbation que le point maximal de l'articulateur. La voyelle [u] est celle qui a été la plus perturbée sur le plan de la forme tandis que la voyelle [i] est celle pour qui le point maximal de la langue a subi le plus de variations. La voyelle [y] a été la moins perturbée. Les paramètres articulatoires de deux des quatre locuteurs adultes n'ont d'ailleurs subi aucun changement significatif lors de la production de cette voyelle en condition perturbée.

3.3 Corrélations articulatoire-acoustiques

Le fait d'avoir étudié les productions vocaliques aux plans articulatoire et acoustique permet par la suite, de déterminer à quel point les paramètres articulatoires sélectionnés peuvent refléter les valeurs acoustiques produites. Les données articulatoires permettent également de déterminer si des différences significatives, sur le plan acoustique, entre les conditions normales et perturbées sont le reflet d'une compensation incomplète ou nulle. En effet, dans ce cas, si les données articulatoires révèlent un déplacement de la langue, il sera proposé qu'une manœuvre de compensation a été tentée, sans toutefois avoir été pleinement efficace dans l'atteinte du but perceptif.

D'abord, les paramètres articulatoires ont été corrélés avec les paramètres acoustiques F1, F2 et F3. Les paramètres F1 et F3 seuls peuvent difficilement différencier les voyelles [i], [y] et [u] entre elles. En effet, se situant toutes dans la partie supérieure du trapèze vocalique, ces voyelles ont toutes un F1 relativement bas. Quant à F3, bien qu'il puisse distinguer les voyelles [i] et [y], la différence de F3 entre [y] et [u] est moins tranchante. Le paramètre acoustique F2 est celui des trois qui parvient le mieux, seul, à distinguer ces voyelles et est donc propice à l'étude des corrélations articulatoire-acoustiques. Ce sont d'ailleurs les corrélations avec le paramètre acoustique F2 qui ont été les plus fortes et qui seront donc ici présentées, pour chaque locuteur. Les paramètres *X de Y max* et *Position de la courbure* sont ceux pour qui les corrélations avec F2 ont été les plus fortes. Cela n'est pas surprenant puisque ces deux paramètres articulatoires sont ceux reliés à la position avant ou arrière de la langue. Les figures 3.83 à 3.90 illustrent les corrélations de ces paramètres avec le

paramètre acoustique F2 pour chaque locuteur. Toutes les corrélations se sont avérées significatives pour chaque locuteur, pour l'un ou l'autre des paramètres articulatoires retenus.

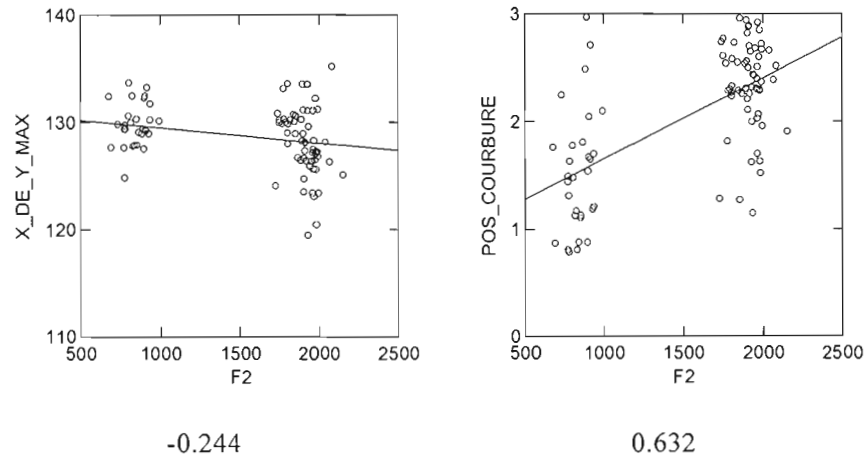


Figure 3.83 Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locuteur AC_a). Le coefficient de corrélation R est indiqué sous chaque corrélation.

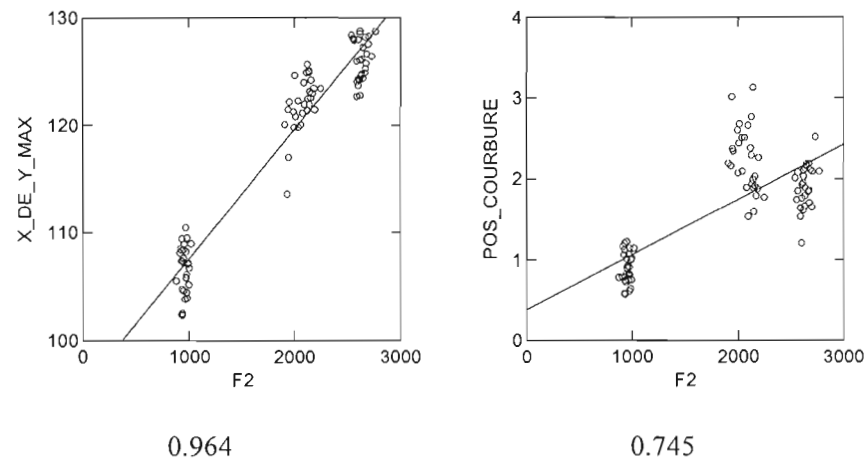


Figure 3.84 Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice AL_a). Le coefficient de corrélation R est indiqué sous chaque corrélation.

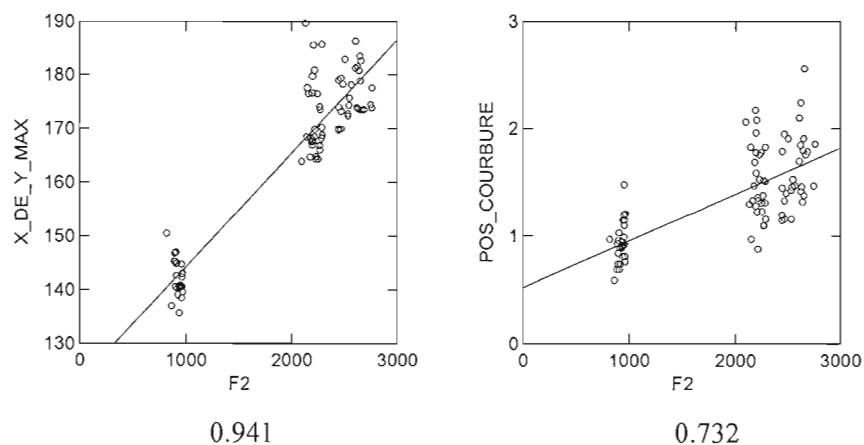


Figure 3.85 Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice JR_a). Le coefficient de corrélation R est indiqué sous chaque corrélation.

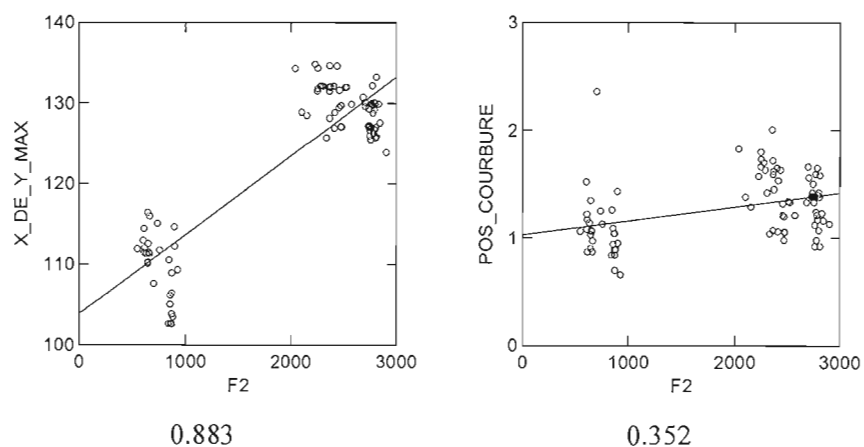


Figure 3.86 Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice MB_a). Le coefficient de corrélation R est indiqué sous chaque corrélation.

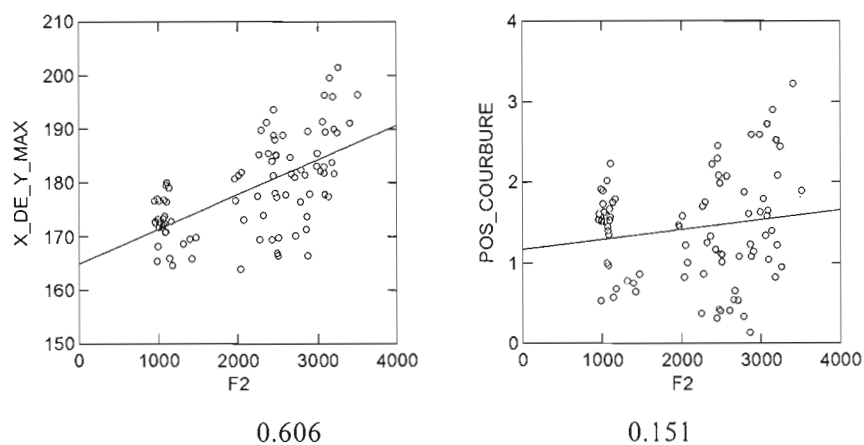


Figure 3.87 Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice BP_e). Le coefficient de corrélation R est indiqué sous chaque corrélation.

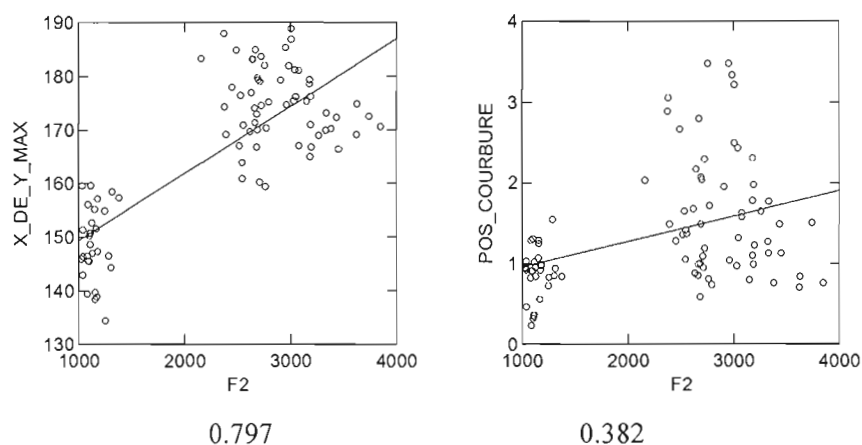


Figure 3.88 Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locuteur JC_e). Le coefficient de corrélation R est indiqué sous chaque corrélation.

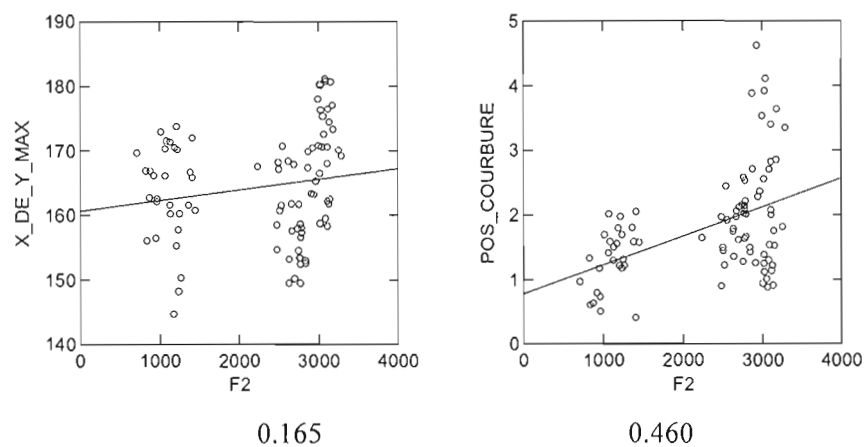


Figure 3.89 Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locuteur LB_e). Le coefficient de corrélation R est indiqué sous chaque corrélation.

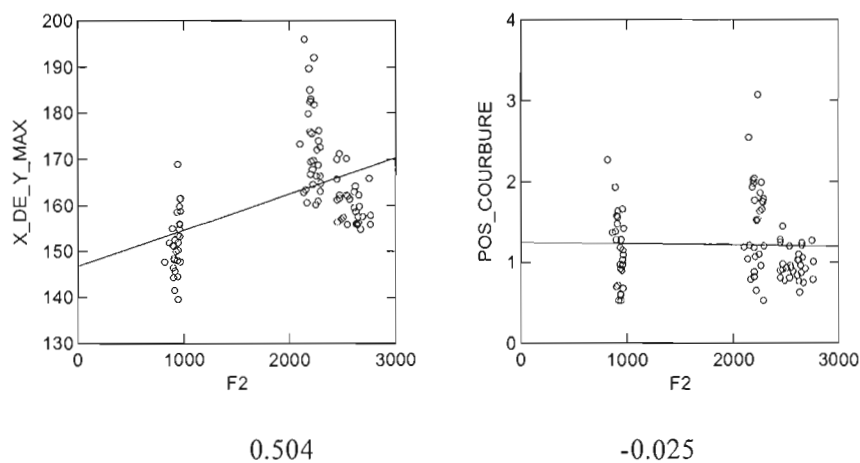


Figure 3.90 Corrélations de F2 avec les paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure, pour les voyelles [i], [y] et [u], toutes conditions de production confondues (locutrice MC_e). Le coefficient de corrélation R est indiqué sous chaque corrélation.

Des régressions linéaires ont révélé que toutes les corrélations se sont avérées très significatives avec au moins un des deux paramètres articulatoires retenus, tel que montré par le tableau 3.9.

Tableau 3.9 Corrélations significatives des paramètres articulatoires X de Y max et Position de la courbure avec le paramètre acoustique F2, résultant des régressions linéaires effectuées (*= $p < 0.05$; **= $p < 0.01$; ***= $p < 0.001$)

Locuteur	X de Y max		Position de la courbure	
	F	p	F	p
AC_a	5.59	0.020 *	58.45	< 0.001 ***
AL_a	1164.45	< 0.001 ***	109.86	< 0.001 ***
JR_a	682.20	< 0.001 ***	101.33	< 0.001 ***
MB_a	312.17	< 0.001 ***	14.73	< 0.001 ***
BP_e	43.89	< 0.001 ***	2.00	0.161
JC_e	151.77	< 0.001 ***	14.87	< 0.001 ***
LB_e	2.48	0.119	23.59	< 0.001 ***
MC_e	29.93	< 0.001 ***	0.05	0.816

Le paramètre articulatoire X de Y max est celui pour qui les corrélations ont été les plus fortes. Cependant, il semble que ce ne soit pas toujours ces deux dimensions ensemble qui puissent caractériser tous les locuteurs parce que de faibles corrélations avec l'un ou l'autre des paramètres ont tout de même été observées. Toutefois, les fortes corrélations obtenues avec ces deux paramètres constituent tout de même un appui supplémentaire considérable à la méthode d'analyse des données articulatoires choisie.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de dégager plusieurs éléments importants, tant par rapport aux résultats que sur le plan méthodologique. Tout d'abord, les résultats acoustiques ont montré que certains locuteurs étaient capables d'élaborer des stratégies compensatoires très efficaces. Les principaux formants affectés par les perturbations ont été ceux indiqués par les simulations,

c'est-à-dire F3 pour [i] et [y] et F2 pour [u]. Cependant, les directions de ces changements formantiques n'ont pas toujours été les mêmes pour chaque voyelle ou pour chaque locuteur. Aussi, la fréquence fondamentale s'est trouvée à varier significativement pour toutes les voyelles. Ici aussi, la direction de ce changement n'a pas été constante. Du point de vue articulatoire, la voyelle [u] est celle qui a été la plus affectée par la perturbation. En général, toutes voyelles confondues, la condition de production a eu un effet plus marqué sur la forme de la langue que sur sa position. Des effets postperturbations ont été remarqués tant sur le plan acoustique que sur le plan articulatoire. Finalement, la nouvelle méthode d'analyse des données articulatoires introduite dans ce chapitre s'est prouvée efficace en illustrant de manière pertinente les espaces articulatoires des locuteurs et en obtenant des corrélations très significatives. Une comparaison des résultats articulatoires et acoustiques sera menée dans la discussion afin de déterminer les locuteurs qui ont produit des compensations complètes ou incomplètes.

CHAPITRE IV

ÉTUDE PERCEPTIVE DES STRATÉGIES DE COMPENSATIONS

Après avoir étudié les compensations acoustiques et articulatoires sur le plan de la production, les productions acoustiques seront étudiées sur le plan de la perception. Cela permettra premièrement de vérifier, à l'aide d'un critère perceptif, si les locuteurs ont été capables de produire des stratégies de compensations efficaces afin de compenser complètement pour les perturbations. Deuxièmement, cette analyse perceptive déterminera les meilleurs corrélats acoustiques de la qualité des voyelles [i], [y] et [u], rendant compte par le fait même de la tâche du locuteur lorsqu'il s'agit de produire une voyelle haute de bonne qualité.

4.1 Méthodologie

4.1.1 Sujets

Vingt auditeurs ont participé à ce test de perception, qui comprenait les voyelles produites par sept des huit sujets qui ont participé au test de production (les voyelles de la locutrice AL_a n'ont pas été incluses dans ce test en raison de problèmes techniques). Les auditeurs étaient tous âgés entre 19 et 25 ans (moyenne de 21,35 ans) et comptaient autant d'hommes que de femmes. Les sujets ont été recrutés à l'Université du Québec à Montréal et chacun d'eux a reçu 5\$ pour sa participation. Aucun des sujets n'avait de problème d'audition.

4.1.2 Stimuli

Les voyelles qui ont servi au test de perception ont été les répétitions 1, 3, 5, 7 et 9 des voyelles [i], [y] et [u], prononcées dans les trois conditions production (normale préperturbation, perturbée, normale postperturbation) par chacun des locuteurs. Le fait d'inclure la première répétition est important puisque cela permet d'étudier le caractère \pm instantané de la compensation. Quelques stimuli contrôles [a] ont été placés parmi ces voyelles afin de s'assurer de l'attention constante des auditeurs. Les voyelles [i], [y] et [u] ont été séparées pour former trois parties différentes. Chacune des parties comprenait 128 voyelles, dont 8 étaient des stimuli contrôles. La durée des stimuli n'a pas été uniformisée puisque celle-ci variait passablement, mais tous étaient suffisamment longs pour minimiser l'effet de la durée sur la perception (lors des tests de production, les locuteurs étaient forcés de produire une voyelle soutenue afin d'obtenir une certaine stabilité acoustique). Par contre, l'intensité sonore des stimuli a été normalisée pour ne pas que l'intensité de la voyelle ait d'effet sur le jugement de l'auditeur.

4.1.3 Instrumentation

Le test était d'une durée de 30 minutes et se déroulait dans un endroit calme. Un ordinateur portable muni d'un casque d'écoute AudioTechnica ATH-M20 et d'une carte de son SoundMax a été utilisé pour faire passer le test. Le logiciel Praat, version 4.3.16 a servi à la conception et à la passation de ce test de perception. Préalablement au test, une phase de familiarisation comprenant 8 stimuli autres que ceux utilisés pour le test était complétée par chaque sujet. La double tâche de l'auditeur consistait à identifier la voyelle perçue et à noter la qualité de celle-ci à l'aide de l'interface présenté à la figure 4.1. L'échelle de qualité allait de *mauvaise* à *excellente*, avec les valeurs correspondantes de 1 à 5, 5 représentant la meilleure qualité.

1 / 128

Identifiez la voyelle perçue et notez la qualité de celle-ci

I hibou	U utile	OU oubli
Ê éléphant	EU heureux	Ô auto
È lait	E oeuf	O horloge
À avion	Â chat	

Mauvaise	Passable	Moyenne	Bonne	Excellente
----------	----------	---------	-------	------------

Figure 4.1 Interface du test de perception. La partie supérieure sert à l'identification de la voyelle tandis que la partie inférieure sert au jugement de qualité. La progression du test est connue à l'aide des chiffres situés dans le coin supérieur gauche de la fenêtre.

Pour chacune des trois parties du test, les stimuli étaient présentés en ordre aléatoire et n'étaient écoutés qu'une seule fois.

4.1.4 Traitement des résultats

D'abord, pour chacun des stimuli, le nombre de réponses correctes a été comptabilisé. Puisque chaque stimulus était présenté une seule fois, le nombre maximal de bonnes réponses était de 20. Les voyelles majoritairement bien perçues ont aussi été retenues, dans certaines des analyses subséquentes. Un stimulus était considéré majoritairement bien perçu si au moins 50% des réponses étaient correctes. Par exemple, un stimulus produit [i] était considéré majoritairement perçu [i] si au moins 11 auditeurs avaient perçu ce stimulus comme étant [i]. Si moins de 11 auditeurs ont perçu ce stimulus [i], il est considéré comme étant « perçu autre que [i] ».

En ce qui concerne la qualité, l'échelle des jugements a été convertie en valeurs numériques, la qualité *mauvaise* correspondant à 1 et la qualité *excellente* correspondant à 5. Les valeurs 2, 3 et 4 ont été attribuées aux jugements de qualité intermédiaires. La qualité moyenne a été calculée pour les stimuli majoritairement bien perçus. Par exemple, seuls les stimuli produits [i] perçus [i] par au moins 11 auditeurs ont été considérés, de même que seuls les stimuli produits [y] perçus [y] par au moins 11 auditeurs et seuls les stimuli produits [u] perçus [u] par au moins 11 auditeurs ont été considérés pour la valeur moyenne de qualité. De plus, pour ces stimuli majoritairement bien perçus, seuls les jugements des auditeurs ayant correctement identifié la voyelle ont été inclus dans les calculs. Par exemple, si un stimulus produit [i] a été perçu [i] par 18 auditeurs, alors les jugements de ces 18 auditeurs ont été inclus dans le calcul de la qualité moyenne perçue pour ce stimulus.

Pour les représentations graphiques, les valeurs de qualité ont été arrondies à l'entier inférieur, créant ainsi une échelle de qualité de 1 à 4 (aucune voyelle avec un taux d'identification supérieur à 50% n'avait de qualité moyenne inférieure à 1) pour les voyelles correctement identifiées. Une note de qualité de 0 a été attribuée aux voyelles perçues « autres ».

4.2 Résultats

4.2.1 Intelligibilité

Le nombre de stimuli majoritairement bien identifiés (par au moins 11 auditeurs) pour chaque condition, voyelle et locuteur est présenté dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Nombre de voyelles correctement identifiées pour chacun des locuteurs

Locuteur	Voyelle et condition								
	i			y			u		
	n1	p	n2	n1	p	n2	n1	p	n2
AC_a	5	0	5	5	5	5	5	5	5
JR_a	5	0	5	5	5	5	5	5	5
MB_a	5	4	5	5	3	5	5	5	5
BP_e	5	3	5	1	5	3	3	0	2
JC_e	5	2	5	5	5	5	5	5	5
LB_e	5	5	5	4	3	5	4	0	5
MC_e	5	3	5	5	2	5	5	5	5

Chez les adultes, toutes les voyelles produites en condition normale ont été correctement identifiées par les locuteurs, tandis que plusieurs des voyelles produites par les enfants en condition normale ont été perçues comme des voyelles autres. Dans un cas (la voyelle [y] de la locutrice BP_e), les voyelles produites en condition perturbée ont même été mieux identifiées que celles dans les deux conditions normales. Pour les autres sujets, le nombre d'identifications correctes en condition n2 a été supérieur ou égal à celui en condition perturbée. Les voyelles qui n'ont pas été correctement identifiées [i] et [y] ont majoritairement été identifiées respectivement [y] et [i]. Pour la voyelle [u], les voyelles perçues autres ont été [o], [ɔ], [ø] et [œ]. La tendance pour [u] à être perçue comme une voyelle plus centrale est un phénomène connu, comme la tendance pour [y] à être perçu [i]. La figure 4.2 représente d'ailleurs un schéma des erreurs d'identification vocalique les plus communes.

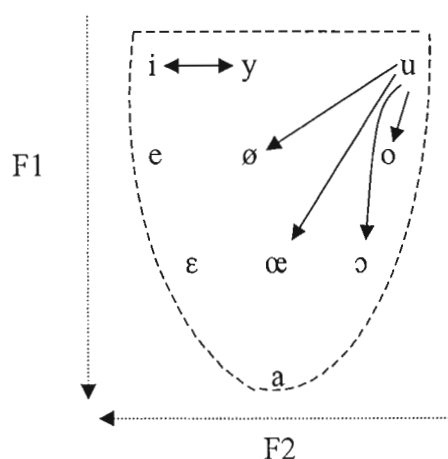


Figure 4.2 Erreurs d'identification les plus communes.

4.2.2 Qualité et corrélats acoustiques

Afin de déterminer si les locuteurs ont été capables de compenser pour la perturbation lors d'au moins une des cinq répétitions sélectionnées, la répétition en condition perturbée où la qualité a été la meilleure a été comparée avec la moyenne de la condition normale pour chaque locuteur. Le numéro de cette répétition a également été noté. Le tableau 4.2 illustre d'ailleurs ces résultats, pour chacune des trois voyelles.

Tableau 4.2 Qualité de la meilleure répétition en condition perturbée (p) et qualité moyenne de la condition normale préperturbation (n) (1=mauvaise, 5=excellente)

Sujet	Voyelle								
	i			y			u		
	nl	p	Rép.	nl	p	Rép.	nl	p	Rép.
AC_a	3.41	-	-	3.78	4.42	3	3.98	4.25	9
JR_a	3.97	-	-	4.19	4.45	5	4.17	4.45	5
MB_a	3.43	3.74	9	3.57	3.20	3	3.25	3.29	7
BP_e	2.60	2.79	7	3.12	3.44	9	3.36	-	-
JC_e	3.66	3.58	5	3.79	4.00	1	4.16	4.20	5
LB_e	3.50	3.50	5	3.54	3.25	9	3.30	-	-
MC_e	3.52	3.76	7	3.88	3.57	7	3.46	3.29	9

Il est intéressant de noter, premièrement, qu'aucun des locuteurs n'est parvenu à compenser totalement pour toutes les perturbations. Deux adultes et deux enfants ont même été incapables de compenser suffisamment pour que leurs voyelles soient perçues [i] ou [u]. Cependant, tous les locuteurs ont été capable de faire cette compensation pour au moins une des trois voyelles. Pour chaque voyelle, quatre des sept locuteurs ont prononcées des voyelles en condition perturbée de qualité supérieure ou égale à la moyenne de leurs répétitions en condition normale préperturbation. Il est possible également de remarquer que les meilleures répétitions ne sont pas nécessairement les dernières, mais que les moyennes de celles-ci (respectivement de 6.6, 5.3 et 7 pour [i], [y] et [u]) sont toutes supérieures à cinq.

Après avoir comparé la condition perturbée avec la condition normale précédant l'introduction de la perturbation, il est intéressant de comparer maintenant les deux conditions normales entre elles afin d'observer s'il y a eu amélioration des productions en condition postperturbation. Les résultats de chaque sujet se trouvent dans le tableau 4.3, qui regroupe les valeurs moyennes des conditions normale préperturbation (n1) et normale postperturbation (n2). Lorsque des différences significatives ont été observées, celles-ci ont été marquées à l'aide d'astérisques juxtaposés à la valeur la plus élevée.

Tableau 4.3 Qualité moyenne des répétitions en conditions normale préperturbation (n1) et normale postperturbation (n2) (1=mauvaise, 5=excellente)

Sujet	Voyelle					
	i		y		u	
	n1	n2	n1	n2	n1	n2
AC_a	3.41	3.97*	3.78	4.17**	3.98	4.15*
JR_a	3.97	3.98	4.19	4.51**	4.17	4.28
MB_a	3.43	3.72	3.57	3.42	3.25	3.18
BP_e	2.60	3.24	3.12	2.60	3.36	2.64
JC_e	3.66	3.90*	3.79	3.71	4.16	4.37
LB_e	3.50	3.98**	3.54*	3.22	3.30	3.40
MC_e	3.52	3.68	3.88	3.62	3.46	3.97*

Tous locuteurs confondus, il n'y a que pour la voyelle [i] que la moyenne en n1 est significativement différente de la moyenne en n2 ($t=-2.965$, $p=0.004$). Pour tous les locuteurs,

la moyenne en n2 est supérieure ou égale à celle en n1 (les différences significatives sont marquées par la présence d'un astérisque dans la colonne n2, et les résultats complets de l'analyse sont disponibles en annexe). Bien que pour les voyelles [y] et [u] de la locutrice BP_e, les moyennes en n2 soient inférieures à celles en n1, cette différence n'est pas significative, étant donné le faible nombre de bonnes identifications pour cette voyelle, qui variait de deux à trois.

Le fait d'avoir un jugement de qualité pour la moitié des voyelles produites par les locuteurs (les répétitions 1,3,5,7 et 9) permet de définir les corrélats acoustiques, sur le plan perceptif, des meilleures productions des voyelles. Pour ce faire, des régressions linéaires ont été faites pour chaque voyelle afin de trouver les indices acoustiques pouvant le mieux caractériser les voyelles de bonne qualité. Les indices qui ont servi à trouver les meilleurs corrélats ont été les suivants, exprimés en bark : F0, F1, F2, F3, F4, F1-F0, F2-F0, F3-F0, F4-F0, F2-F1, F3-F1, F4-F1, F3-F2, F4-F2, F4-F3, F2'. Le choix de ces paramètres a été guidé par les études antérieures sur les corrélats acoustiques invariants de la perception des voyelles du français (Ménard et al., 2002; Savariaux et al., 1995; 1999).

Pour la voyelle [u], le critère acoustique définissant le mieux l'objectif perceptif semble être la valeur de F1, avec un taux de corrélation de 0.662 ($F=80.248$, $p<0.001$). Comme le montre la figure 4.3, cet indice seul permet de différencier efficacement les bons [u] des voyelles qui n'ont pas été perçues [u]. Aucun [u] avec un $F1 > 5$ bark n'a été jugé comme étant d'excellente qualité. Les voyelles se retrouvant en haut de 5 bark sont celles qui ont été mal perçues, et dont la majorité a été perçue [o].

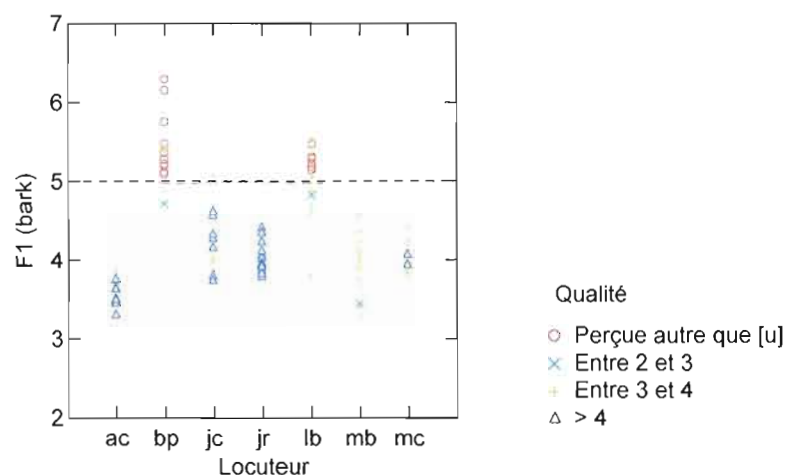


Figure 4.3 Répartition des voyelles produites [u] selon la qualité perçue, à l'aide du critère acoustique F1.

Pour la voyelle [y], le critère de focalisation F3-F2 et F2 ont été ceux qui ont obtenu les plus fortes corrélations (F1 : $F=20.326$, $p<0.001$, $R=0.406$; F2 : $F=9.566$, $p=.003$, $R=0.292$), avec un taux de corrélation combiné de 0.445. Comme le montre la figure 4.4, la majorité des voyelles avec un F2 < 14 bark ont été perçues comme étant de très bonne ou d'excellente qualité. Les voyelles de moins bonne qualité se situant dans cette zone appartiennent toutes à la même locutrice (MC_e), comme le montre la figure 4.5.

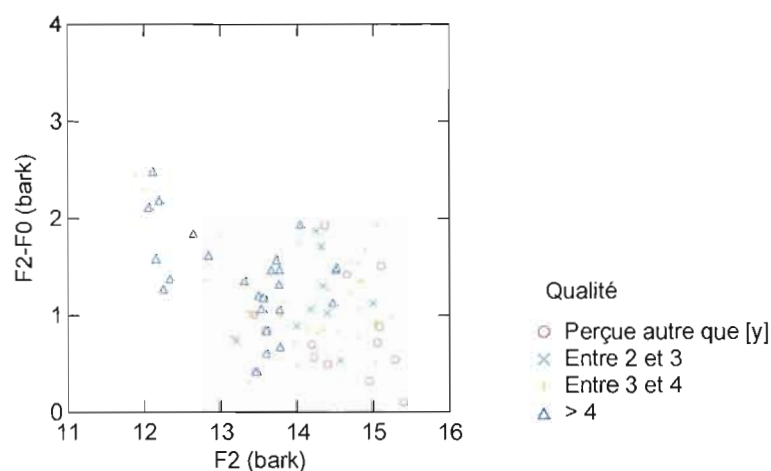


Figure 4.4 Répartition des voyelles produites [y] selon la qualité perçue, à l'aide des critères acoustiques F2 et F2-F0.

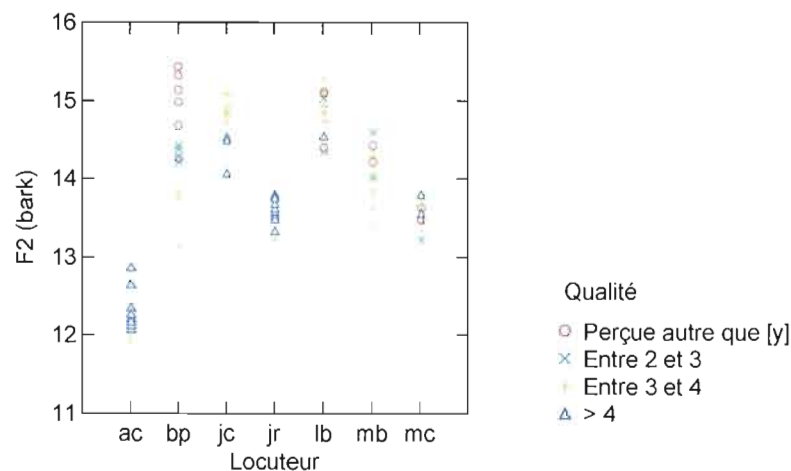


Figure 4.5 Répartition des voyelles produites [y] par chaque locuteur selon la qualité perçue, à l'aide du critère F2.

Pour la voyelle [i], la meilleure corrélation a été trouvée avec F2-F1 ($F=8.504$, $p=0.004$, $R=0.276$). La figure 4.6 montre la dispersion des voyelles sur le plan F2 vs F2-F1. La majorité des voyelles perçues autres se retrouvent dans une zone où $F2-F1 < 10.5$. Aussi, les voyelles de bonne qualité s'y retrouvant sont presque exclusivement celles du locuteur AC_a. Il est également pertinent de constater les valeurs plus faibles que les autres locuteurs en F2 pour ce locuteur.

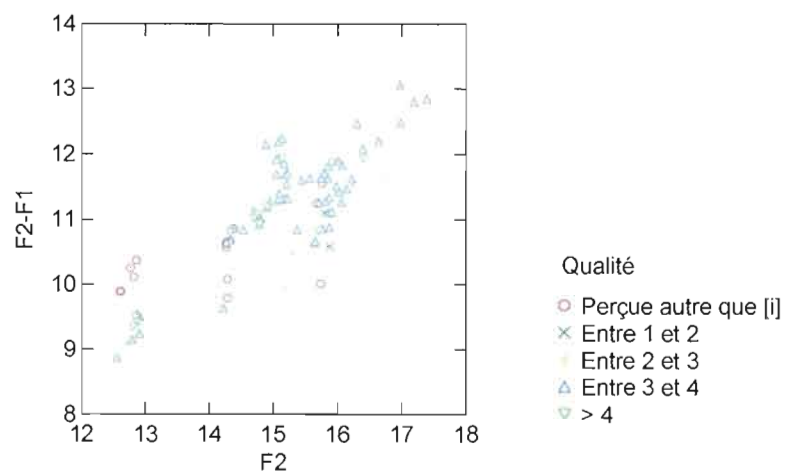


Figure 4.6 Dispersion des voyelles produites [i] selon la qualité perçue sur le plan F2 vs F2-F1.

Les figures 4.7 et 4.8 montrent que pour les autres locuteurs, les voyelles moins bien perçues se trouvent majoritairement dans la partie inférieure de la distribution des voyelles de chaque locuteur, et que les voyelles les mieux perçues (dont la qualité est plus grande que 4) se trouvent presque toutes dans la partie supérieure.

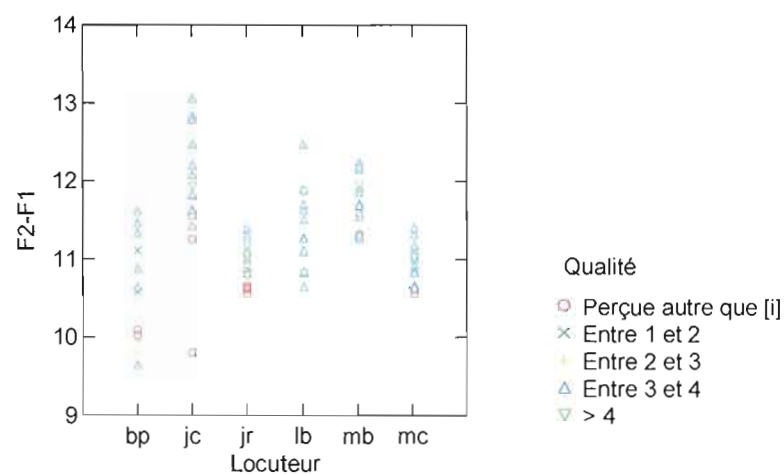


Figure 4.7 Répartition des voyelles produites [i] selon la qualité perçue à l'aide du critère F2-F1. Les voyelles du locuteur AC_a ont été retirées.

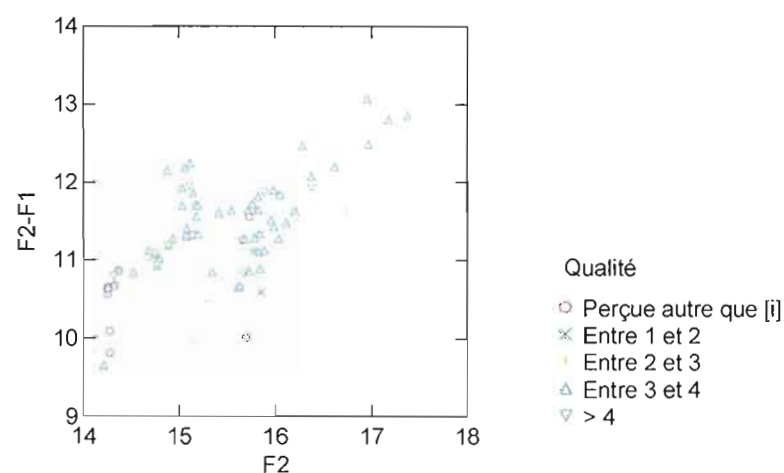


Figure 4.8 Dispersion des voyelles sur le plan F2 vs. F2-F1 selon la qualité perçue. Les voyelles du locuteur AC_a ont été retirées.

4.3 Conclusion

L'analyse des résultats du test de perception a donc permis de dégager les indices acoustiques majeurs lorsqu'il s'agit de produire un [i], un [y] ou un [u] de bonne qualité. Les corrélats acoustiques de la qualité de ces voyelles sont les suivants : F2-F1 pour [i], F2 pour [y] et F1 pour [u]. Au niveau des compensations effectuées, le critère perceptif a montré que les locuteurs étaient capables d'effectuer des compensations complètes, et ce autant chez les enfants que chez les adultes. Cependant, aucun locuteur n'a réussi à faire de compensation complète pour toutes les voyelles.

CHAPITRE V

DISCUSSION

5.1 Détermination des stratégies compensatoires optimales

Les liens entre les configurations articulatoires adoptées par les locuteurs et les changements des paramètres acoustiques qui en résultent feront l'objet de cette première partie de la discussion. Les modifications sur les plans acoustique et articulatoire seront mises en relation avec les données perceptives pour dégager les principales manœuvres utilisées afin de déterminer quelles configurations articulatoires reflètent les stratégies de compensation optimales. Pour ce faire, les résultats acoustiques, articulatoires et perceptifs décrivant les manœuvres de compensation pertinentes seront résumés voyelle par voyelle, et les stratégies optimales seront comparées à celles issues des simulations.

5.1.1 La voyelle [i]

En ce qui concerne les productions faites en condition perturbée pour cette voyelle, des configurations articulatoires variées ont été adoptées par les locuteurs. Globalement, chaque paramètre articulatoire a été significativement affecté dans un sens ou dans l'autre. Il n'y a donc aucune tendance majeure susceptible de se retrouver chez tous les sujets.

Pour cette voyelle, les stimuli produits par les locuteurs enfants ont été mieux identifiés que ceux produits par les adultes. En effet, au moins deux répétitions sur cinq ont été bien identifiées pour chacun des locuteurs enfants, tandis que seulement un locuteur adulte a réussi à produire des voyelles [i] qui ont été perçues [i]. L'ampleur de la perturbation utilisée

peut expliquer ce fait puisque, tel qu'indiqué par les simulations, les changements acoustiques induits par la perturbation étaient plus grands chez les adultes que chez les enfants.

Le tableau 5.1 regroupe les effets significatifs (selon les ANOVAs) observés en condition perturbée par rapport à la condition préperturbation pour les locuteurs LB_e, MB_a, BP_e, MC_e et JC_e, qui ont obtenu des scores d'identification respectivement de cinq, quatre, trois, deux et deux, sur une possibilité de cinq.

Tableau 5.1 Effets de la condition perturbée par rapport à la condition normale sur les paramètres articulatoires et acoustiques (↑=augmentation; ↓=diminution; ←=déplacement vers la gauche; →= déplacement vers la droite; *=significatif à $p<0.05$; **significatif $p<0.01$; ***=significatif à $p<0.001$)

Locuteur	Paramètres							
	Y max	X de Y max	Courbure	Position de la courbure	F0	F1	F2	F3
LB_e	↑ ***	← **	↓ ***	→ ***		↑ *	↓ *	↓ **
MB_a					↑ *			↓ **
BP_e		← *						↓ **
MC_e	↓ ***		↓ *		↓ *		↓ **	
JC_e	↑ ***	→ **	↓ **	→ ***	↑ ***			

Le locuteur qui a obtenu le meilleur score d'identification (LB_e) est celui dont les paramètres articulatoires ont subi le plus de modifications. Puisque chacune des modifications de ces paramètres se retrouve également chez au moins un des autres locuteurs qui ont produit des voyelles perçues [i], il est possible de croire que la configuration articulatoire reflétée par ces changements paramétriques constitue une stratégie de compensation efficace. En regard aux simulations effectuées, cette stratégie diffère de celles produites par le modèle en ce qui a trait au point maximal de la langue. Cependant, les configurations articulatoires simulées pour compenser la perturbation pour la voyelle [i] ressemblent tout de même à la stratégie élaborée par le locuteur LB_e en ce sens que les

paramètres de forme ont évolué dans le même sens, c'est-à-dire qu'il y a eu une diminution de la courbure de la langue et un avancement de cette courbure.

En ce qui concerne les paramètres acoustiques, la fréquence fondamentale joue peut-être un rôle dans la compensation puisque les locuteurs qui ont obtenu les meilleurs scores d'identification sont ceux pour qui le paramètre F0 a subi le moins de modification (ce qui diffère des résultats obtenus par Savariaux et al. (1999) pour la voyelle [u]). Aussi, il est étonnant d'observer que les paramètres F1, F2 et F3 ont tous varié de façon significative pour le locuteur LB_e, étant donné le fait que c'est celui pour qui le nombre de voyelles correctement identifiées a été le plus grand. Pour la locutrice MB_a, il est surprenant qu'une aussi grande stabilité articulatoire ait résulté en si peu de différences des valeurs formantiques étant donné l'importance des effets acoustiques générés par la perturbation labiale. Il faut aussi remarquer que les paramètres F1 et F2 n'ont pas été modifiés significativement pour respectivement quatre et trois de ces cinq locuteurs qui ont produit des voyelles correctement identifiées.

Finalement, il faut préciser que les locuteurs qui ont produit les voyelles les mieux identifiées ne sont pas nécessairement ceux qui ont produit les voyelles les mieux jugées au niveau de la qualité. Cependant, les locuteurs qui ont obtenu un score d'identification correct d'au moins trois sur cinq ont tous amélioré la qualité de la voyelle produite, à l'exception du locuteur LB_e, pour qui la qualité de la meilleure répétition en condition perturbée a été égale à la qualité moyenne des voyelles produites en condition normale préperturbation.

5.1.2 La voyelle [y]

Pour cette voyelle, deux locuteurs adultes (AC_a et JR_a) et deux locuteurs enfants (BP_e et JC_e) sont arrivés à faire une compensation complète sur le plan perceptif, en produisant des voyelles qui ont toutes été correctement identifiées et dont la qualité de la meilleure répétition en condition perturbée a été supérieure à la qualité moyenne des voyelles produites en condition préperturbation. Sur le plan acoustique, les locuteurs adultes qui ont bien compensé

pour les paramètres F1 et F2 sont ceux dont les voyelles ont été les mieux identifiées et les mieux jugées. Chez les enfants, les voyelles dont la qualité a été la plus élevée se sont également retrouvées chez les locuteurs qui ont fait de bonnes compensations sur le plan F1 vs F2.

Parmi les différentes tendances articulatoires observées, trois locuteurs enfants ont adopté une stratégie semblable pour pallier la perturbation lors de la production de la voyelle [y]. En effet, les paramètres de forme (courbure et position de la courbure) se sont vu modifiés dans le même sens pour les locuteurs BP_e, LB_e et MC_e. Deux locuteurs (JC_e et JR_a) ont modifié un de ces deux paramètres dans la même direction que les trois locuteurs enfants, c'est-à-dire que la courbure a diminué ou que la position de celle-ci s'est déplacée vers l'avant. Ces deux paramètres sont étroitement liés dans ce changement de configuration articulatoire puisque pour la voyelle [y], la langue est dans une position relativement arquée, et en se rapprochant de la partie alvéolaire du palais, la courbure doit nécessairement diminuer afin de ne pas former d'occlusion qui pourrait obstruer le passage de l'air. Cependant, pour la locutrice AL_a, le paramètre courbure a augmenté, tout comme le paramètre position de la courbure. Ce cas est intéressant puisqu'à première vue, ce changement de forme paraît difficilement concevable. Seulement, lorsque les contours de la condition perturbée sont comparés à ceux de la condition normale (figure 5.1), une explication claire fait surface.

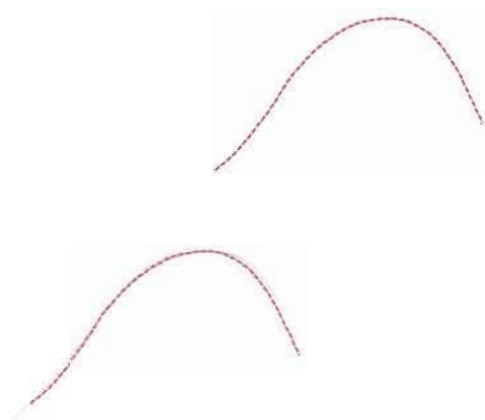


Figure 5.1 Contours typiques de la locutrice AL_a. Augmentation de la courbure et avancement de celle-ci lors de la condition perturbée (ligne pointillée) par rapport à la condition normale préperturbation (ligne pleine). Noter la superposition des formes (bas).

Comme le montre la Figure 5.1, la position du point maximal n'est pas affectée par une telle stratégie articulatoire. Aussi, il est étonnant de constater à quel point les formes se superposent. Cependant, cela ne signifie pas pour autant que la configuration de la langue est la même pour les deux conditions. Les changements des valeurs des paramètres observés semblent justement être dus à une configuration articulatoire différente en condition perturbée. L'augmentation des paramètres courbure et position de la courbure semble être le résultat de la meilleure visualisation de la partie antérieure de la langue. Cela est probablement la conséquence directe du recul de l'apex. Ce recul de l'apex rendrait la langue plus compacte et empêcherait l'air de prendre place dans la cavité sublinguale. Par le fait même, la propagation des ondes ultrasoniques ne serait plus bloquée par l'air, cette frontière étant éliminée. Cela permettrait d'illustrer l'apex en entier et rendrait compte des différences observées.

Si pour cette locutrice, l'apex a reculé, pour d'autres (LB_e et MC_e) c'est la position du point maximal de la langue sur l'axe horizontal qui a subi un déplacement vers l'avant. Les voyelles produites par ces locuteurs en condition perturbée font partie de celles qui ont été le moins bien identifiées. En effet, seulement 3 et 2 des voyelles produites respectivement par LB_e et MC_e ont été perçues [y]. L'avancement du corps de la langue ne constitue donc pas une stratégie efficace. Il est également important de noter que pour la locutrice MC_e, le point maximal de la langue augmente également en hauteur. Cela est dû au fait qu'en condition normale, la langue de cette locutrice n'est pas très courbée pour la production de la voyelle [y], comme le montre la Figure 5.2.



Figure 5.2 Contours de la locutrice MC_e pour la voyelle [y], condition normale (gauche) et perturbée (droite).

Même si la variabilité des configurations articulatoires adoptées a été relativement grande, il semble que les locuteurs qui ont reculé le lieu de constriction (effet du recul du point maximal de la langue) et ceux pour qui celui-ci est resté le même soient les locuteurs qui ont effectué les compensations les plus efficaces. Cela est en partie en accord avec les simulations effectuées puisque les stratégies de compensations optimales suggérées par ces simulations ont montré un recul du corps de la langue.

5.1.3 La voyelle [u]

Le locuteur pour qui la compensation a été la plus complète, sur le plan des valeurs acoustiques de production, est le locuteur JC_e. Ce locuteur fait également partie des deux enfants qui ont obtenu un total de cinq identifications correctes en condition perturbée. Ces deux locuteurs (JC_e et MC_e) sont ceux parmi les enfants pour qui le point maximal de la langue ne subit aucun changement sur l'axe horizontal. Chez les adultes, la locutrice MB_a est la seule pour qui il y a eu changement sur cet axe. Pour ce groupe, c'est également celle pour qui la meilleure production en condition perturbée a été jugée la moins bonne. L'avancement du point maximal de la langue n'est donc pas une manœuvre articulatoire favorisant la qualité de la voyelle [u], puisque les voyelles produites par les sujets qui ont adopté cette manœuvre ont toutes été jugées inférieures à 4 en qualité. Le paramètre courbure a également subi des changements importants chez cinq locuteurs mais semble moins lié à la qualité de la compensation que l'emplacement du point maximal ou que la position de la courbure. Ce dernier paramètre semble refléter l'efficacité de la stratégie articulatoire adoptée puisque les trois locuteurs (AC_a, MB_a et MC_e) pour qui un recul de la position de la courbure a été constaté ont tous produits des [u] en condition perturbée qui ont été correctement identifiés. Finalement, les locuteurs qui n'ont pas modifié leur fréquence fondamentale ou pour qui la valeur moyenne de celle-ci a diminué ont tous vu leurs productions en condition perturbée être perçues comme inférieures à 4 en qualité.

Les stratégies de compensation optimales pour les voyelles [i], [y] et [u] pourraient être résumées de la façon suivante. Pour [i], un abaissement et un avancement du corps de la

langue semblent être des éléments caractérisant une certaine efficacité compensatoire. Trois locuteurs ont avancé le point maximal de la langue et la courbure a diminué chez un même nombre de sujets, tout comme la hauteur du point maximal. Ces changements sont ceux qui correspondent en partie aux résultats des simulations. La fréquence fondamentale joue peut-être un rôle majeur puisque l'augmentation de celle-ci semble nuire à la qualité de la voyelle. La variation de ce paramètre est peut-être liée à un effet biomécanique en lien avec l'élévation de la langue, cette hypothèse restant à sonder davantage. Pour [y], la stratégie optimale suggérée par les simulations pourraient être traduite par une augmentation de la courbure et un recul du point maximal de la langue. Ce n'est toutefois pas ce qu'ont fait les sujets, puisque la variation de ces deux paramètres dans ces directions n'a été observée chez aucun d'entre eux. Pour deux sujets, un avancement du point maximal du corps de la langue a été observé, décrivant ainsi une manœuvre qui a nuit à la qualité des voyelles produites. Par conséquent, la stratégie la plus efficace effectuée par les locuteurs a été de reculer la langue afin de déplacer le lieu de constriction, ou alors de maintenir ce dernier. Finalement, pour [u], l'avancement du point maximal de la langue s'est trouvé être un élément n'agissant pas en faveur d'une compensation optimale. C'est plutôt le recul de la position de la courbure qui semble représenter le plus fidèlement l'efficacité de la compensation pour cette voyelle. Une augmentation de la fréquence fondamentale a également aidé à la production de voyelles de bonne qualité.

Pour les trois voyelles, plusieurs différences ont été observées par rapport aux configurations articulatoires suggérées par les simulations. Ces différences peuvent être dues à des modifications des autres paramètres qui n'étaient pas contrôlés par la perturbation, comme la hauteur du larynx, la hauteur de la mâchoire ou alors la protrusion des lèvres. Chaque locuteur a donc pu modifier ses paramètres afin d'établir une stratégie articulatoire globale. Dans certains cas, des locuteurs pour qui les paramètres articulatoires de la langue n'ont pas varié de façon significative ont même réussi à compenser efficacement sur le plan des paramètres acoustiques F1 et F2. C'est le cas entre autres de la locutrice MB_a pour la voyelle [i] et du locuteur AC_a pour la voyelle [y]. De plus, il est fort probable que pour certains locuteurs, les voyelles [i] et [y] ait subi des changements dans leurs affiliations formants-cavités à la suite de ces manœuvres.

Pour conclure ce premier point de discussion, il est important de rappeler que dans cette étude, les locuteurs n'ont eu que 10 répétitions en condition perturbée et que ceux-ci ne se sont pas fait guidées articulatoirement, contrairement à ce qui a été fait dans les études précédentes utilisant un tube labial. En dépit de cela, les locuteurs ont néanmoins été capables de produire des voyelles en condition perturbée de qualité supérieure ou égale aux voyelles produites en condition préperturbation pour une (deux cas) ou deux (cinq cas) des trois conditions de perturbation. Aucun locuteur n'a été capable de compenser complètement pour toutes les perturbations. Cette dernière observation pourrait confirmer l'hypothèse de Gay et al. (1981) selon laquelle l'articulation compensatoire serait de nature sélective. Cependant, il semble plus que cette sélectivité résulte de contraintes biomécaniques plutôt que du choix du locuteur de compenser à certains endroits et non à d'autres.

5.2 Variabilité articulatoire

Les résultats des données articulatoires ont révélé une variabilité intéressante entre les sujets mais également à l'intérieur même des productions d'un même sujet. Pour les adultes, les ellipses du locuteur AC_a montrent une variabilité beaucoup plus importante que les autres sujets en conditions normales. Chez les enfants, les espaces articulatoires de deux sujets (BP_e et MC_e) sont assez bien caractérisés, tandis qu'une plus grande variabilité a été observée chez les locuteurs JC_e et LB_e. Bien que le fait que les sujets montrant le plus de variation articulatoire pour une même voyelle soient tous de sexe masculin soit probablement dû au hasard, il est important de noter que pour les enfants, les sujets pour lesquels la variabilité articulatoire est la plus grande sont les plus jeunes. En effet, la locutrice MC_e était la plus âgée et est celle dont les productions, sur le plan articulatoire, ont été les plus stables en condition normale. Toujours en regard à cette variabilité, le cas du locuteur AC_a est plus difficile à expliquer. Bien que peu probable, il se peut que le sujet ait modifié la position de sa tête par rapport à la sonde au cours des répétitions puisqu'il y a eu des répétitions où ce sujet riait. Ces répétitions ont été écartées mais elles ont peut-être occasionné de légers déplacements du sujet par rapport à la sonde. La locutrice MB_a est un cas intéressant puisque aucun paramètre articulatoire n'a été modifié lors des conditions

perturbées des voyelles [i] et [y]. Des ajustement des autres articulateurs ont probablement eu lieu puisque le nombre de voyelles produites correctement identifiées en condition perturbée a été de quatre pour [i] et trois pour [y].

Une différence qui n'était pas attendue est celle trouvée entre la configuration articuloire de la voyelle [i] et celle de la voyelle [y]. Elle s'explique cependant si l'on considère la géométrie du conduit vocal et les ajustements articuloires possibles pour allonger la cavité avant, c'est-à-dire une protrusion des lèvres et/ou un recul de la langue. Cette différence est marquée au niveau de la position ou de la forme des ellipses pour tous les locuteurs, dans l'une ou l'autre des conditions normales (préperturbation et post-perturbation). Cette différence articuloire est peut-être liée à la capacité des locuteurs à adopter des configurations linguales dans le cadre de stratégies de compensation pour l'une ou l'autre de ces voyelles puisque la locutrice MB_a, pour qui les paramètres articuloires n'ont pas varié en condition perturbée pour [i] et [y], est celle dont les configurations articuloires de [i] et de [y] sont les plus similaires en condition normale. De plus, il est possible que ces voyelles reflètent un cas de compensation complémentaire puisque les locuteurs dont les voyelles [i] ont été les mieux identifiées font partie de ceux dont les voyelles [y] ont été les moins bien identifiées. L'étude des différentes stratégies de production de ces voyelles sur le plan articuloire contribuerait de façon significative à préciser les résultats de Schwartz et al. (1993) et aiderait à mieux comprendre les préférences articuloires adoptées par les locuteurs lors des compensations articuloires.

5.3 Rôle de la fréquence fondamentale

La fréquence fondamentale a été le paramètre acoustique qui a été le plus modifié lors de la condition perturbée, et ce pour toutes les voyelles. Pour la voyelle [i], il semble qu'un changement de F0 contribue à une baisse de la qualité, contrairement à la voyelle [u], pour laquelle une hausse de la fréquence fondamentale semble faire partie de ce qui caractérise une voyelle de bonne qualité.

La corrélation entre l'aperture et la fréquence fondamentale est connue depuis plusieurs années (Traünmüller, 1981). En français, il a été montré que le corrélat acoustique de l'aperture perçue est F1-F0 (Ménard et al., 2002) : les voyelles dont F1-F0 est inférieur à 2 Bark sont perçues hautes (/i y u/). Il est donc envisageable que l'une des stratégies visant à atteindre le but perceptif relié aux voyelles hautes consiste à modifier la valeur de F0. Ainsi, les voyelles ouvertes ont une fréquence fondamentale intrinsèque plus basse que celle des voyelles fermées. Or, les résultats de la présente étude révèlent qu'une hausse de cette fréquence se traduit en un meilleur jugement de la qualité pour la voyelle [u], et qu'une modification de F0 entraîne une baisse de qualité pour [i]. Puisque le tube utilisé pour perturber la voyelle [u] est fort susceptible d'avoir eu pour conséquence une ouverture de la mâchoire, entraînant une augmentation de F1, il est possible que le locuteur pallie ce changement en augmentant la fréquence fondamentale, ce qui diminue la valeur de F1-F0, contribuant ainsi à donner « l'illusion » que la voyelle produite est plus fermée qu'en réalité. Pour la voyelle [u], l'augmentation de la fréquence fondamentale semble être un mécanisme faisant partie de la stratégie de compensation établie par le locuteur. Cette proposition va dans le sens contraire de Cocusse (1996), qui suggérait que ce changement était un réflexe lié à l'introduction de la perturbation, puisqu'un plus grand nombre de ses locuteurs avaient réussi à élaborer une bonne compensation lorsque leur fréquence fondamentale était stabilisée que lorsqu'elle ne l'était pas, comme dans Savariaux (1995). Cependant, le fait qu'il soit possible de réaliser de bonnes compensations lorsque ce paramètre est contrôlé ne signifie pas nécessairement qu'il n'entre pas en jeu dans l'élaboration de la stratégie de compensation, puisque d'autres ajustements articulatoires peuvent être faits afin de produire un meilleur [u]. Seulement, il est possible que ce dernier scénario demande un effort articulatoire plus important que lorsque la fréquence fondamentale n'est pas contrôlée et varie naturellement. Cette hypothèse gagnerait à être explorée davantage avec un inventaire de voyelles plus varié.

5.4 La perception des voyelles

Le critère $F1 < 5$ bark caractérisant un bon [u] rejoint en partie les résultats de Savariaux et al. (1999). Ce paramètre acoustique contribue donc à définir la cible perceptive pour cette voyelle, seul ou en combinaison avec d'autres (tels que $F1-F0$ et $F2-F0$). Les résultats pour [i] et pour [y] sont plus surprenants et soulèvent de nombreuses questions concernant les objectifs perceptifs de ces voyelles. Le fait que $F2$ entre en jeu dans la détermination de la zone cible pour ces deux voyelles n'est pas surprenant. Cependant, le fait que le deuxième formant effectif ($F2'$) ne soit pas en forte corrélation avec les jugements de qualité soulève quelques questionnements. Toutefois, les paramètres définissant complètement ou partiellement les cibles perceptives respectent l'hypothèse de Diehl (2000) puisque ce sont des combinaisons simples des valeurs formantiques exprimées dans une échelle psychoacoustique.

La fréquence fondamentale semble définitivement jouer un rôle dans la perception de la qualité des voyelles, que ce soit comme paramètre normalisateur permettant de minimiser certaines distances perceptivement saillantes ($F1-F0$ ou $F2-F0$ pour la voyelle [u] par exemple) ou alors comme paramètre indépendant affectant directement la qualité. D'un point de vue perceptif, les compensations semblent être un effet combiné de $F0$, $F1$ et $F2$, tel qu'observé par Savariaux (1999).

5.5 Le rôle du feedback

Les résultats montrent que le feedback (auditif et somatosensoriel) a joué un rôle important non seulement lors de la condition de perturbation mais également lors de la condition normale postperturbation. En effet, de nombreux effets postperturbations ont été observés, autant sur le plan acoustique que sur le plan articulatoire. La direction des ces effets est illustrée à la figure 5.3 et des cas réels sont présentés à la figure 5.4.

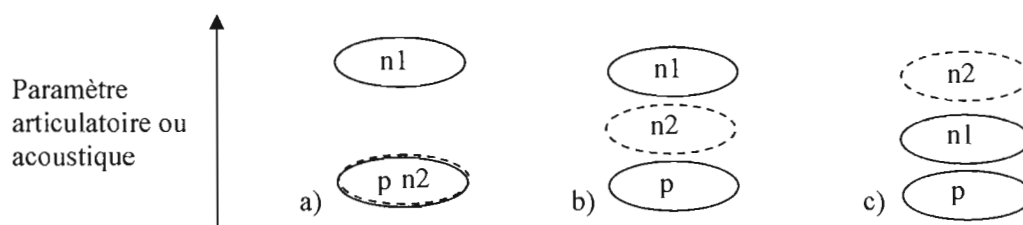


Figure 5.3 Effets postperturbations observés. Les productions en condition postperturbation (lignes pointillées) peuvent être : a) semblables à celles en condition perturbée, b) entre la condition neutre préperturbation et la condition perturbée c) au-delà des valeurs de la condition préperturbation.

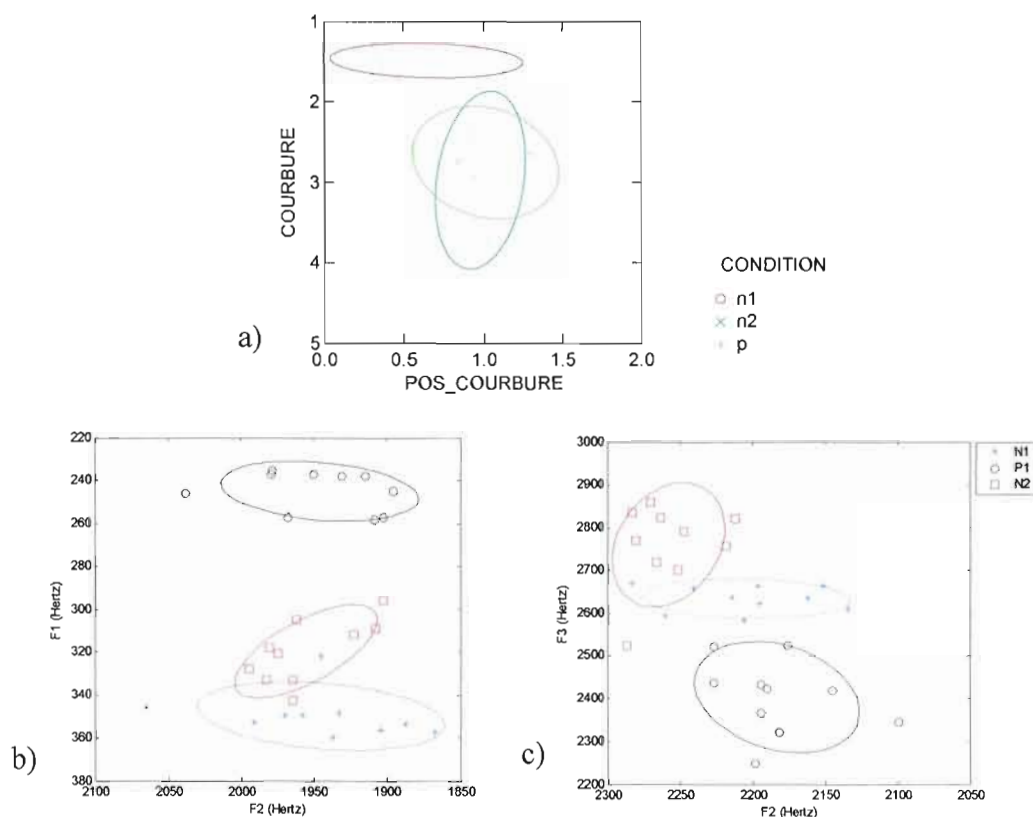


Figure 5.4 Quelques exemples d'effets postperturbations. a) Valeurs de la condition postperturbation (turquoise) semblables à la condition perturbée (vert). b) Valeurs de la condition postperturbation (rouge) comprises entre la condition normale préperturbation (bleu) et la condition perturbée (noir). c) Valeurs de la condition postperturbation (rouge) supérieures à celles de la condition préperturbation (bleu).

La direction de ces effets a varié d'un locuteur à l'autre et d'une voyelle à l'autre. Les effets postperturbations se sont également vus dans la taille des ellipses lorsque les ellipses en $n2$ ont été plus concentriques que celles en $n1$. La présence de ces effets peut être due à l'influence du feedback sur la représentation à court terme des sons dans le modèle interne. Les commandes motrices qui, lors de la perturbation, servent à corriger les erreurs de production, deviennent alors partie de la configuration typique. Lors du retrait de la perturbation, le locuteur retrouve la configuration articulatoire d'origine stockée dans la mémoire à long terme et associée à la voyelle cible. Cependant, cette réadaptation peut se faire de façon instantanée ou progressive. Lors d'une réadaptation progressive, les productions du locuteur en condition postperturbation partent de la zone des valeurs en condition perturbée (figure 5.3 a)) pour se diriger vers les valeurs de la condition préperturbation (figure 5.3 b)). Le feedback auditif agit ici en combinaison avec le feedback somatosensoriel afin d'atteindre la cible vocalique désirée ou alors de préciser cette dernière ou d'atteindre une nouvelle cible (figure 5.3 c)).

5.6 Le développement de l'articulation compensatoire

Les résultats des sujets enfants sont en accord avec ceux de Ménard (2004) et de Baum et Katz (1988) et appuient par conséquent l'hypothèse que le développement de l'articulation compensatoire se fait en même temps que l'enfant apprend à produire des segments phonologiques perceptivement corrects. Bien que les stratégies articulatoires effectuées par les enfants aient été parfois différentes de celles des adultes, ceux-ci ont été capables d'élaborer des stratégies de compensation efficaces. Même si les enfants n'ont pas fini d'élaborer leur modèle interne, il est possible que certains éléments rendent la tâche plus facile, comme de récents antécédents d'articulation compensatoire lorsque ceux-ci parlaient avec des jouets ou de la nourriture dans leur bouche. Également, les locuteurs enfants produisant des répétitions de type essais erreurs ont peut-être été avantagés par un des critères de la compensation sur le plan perceptif puisque la qualité de la meilleure répétition a été retenue plutôt que la moyenne des répétitions en condition perturbée. Cependant, des patrons semblables d'essais erreurs ont également été retrouvés chez les locuteurs adultes.

5.7 La représentation des sons de la parole chez le locuteur

La grande variabilité observée sur les plans acoustiques et articulatoires porte à croire que, tel que suggéré par Perrier (2005), l'objectif du locuteur n'est pas purement acoustique ni purement articulatoire. Le but du processus de production de la parole serait donc de nature multimodale. Cependant, les productions en condition perturbée et les effets postperturbations observés semblent confirmer que les représentations des objectifs dans le modèle interne du locuteur sont bel et bien guidées par des critères acoustiques et que la modalité articulatoire vient appuyer celle acoustique. Le fait que tous les locuteurs aient essayé de compenser pour la perturbation (tous les locuteurs dont aucune des voyelles en condition perturbée n'a été correctement identifiée ont tenté une réorganisation articulatoire) renforce cette hypothèse.

CONCLUSION

Cette étude visait à étudier l'articulation compensatoire chez des adultes et des enfants sur les plans de la production et de la perception. Des simulations faites sur un modèle articulatoire ont indiqué que les perturbations choisies étaient considérables mais que des compensations articulatoires complètes étaient tout de même possibles. Les stratégies articulatoires élaborées par les sujets ont parfois différé de celles suggérées par les simulations en ce qui concerne les paramètres étudiés. Toutefois, bien que les configurations articulatoires des sujets aient été très variables, chacun d'entre eux a été en mesure de compenser totalement pour au moins une voyelle. Cependant, aucun sujet n'a réussi à compenser complètement pour toutes les perturbations.

Sur le plan perceptif, le paramètre acoustique F1 est celui qui semble le mieux définir l'objectif perceptif pour la voyelle [u] ($F1 < 5$ bark) tandis qu'une valeur de F2 inférieure à 14 bark paraît être un critère efficace pour définir une voyelle [y] de qualité optimale. Pour [i], F2 et F2-F1 réussissent à distinguer la majorité des voyelles de bonne qualité de celles qui ont été moins bien perçues. Cependant, la robustesse de ces critères est discutable. La fréquence fondamentale, quant à elle, semble jouer un rôle majeur dans la qualité des voyelles, puisqu'une augmentation de celle-ci a favorisé la qualité de la voyelle [u] tandis qu'une stabilisation du paramètre F0 a contribué à produire des [i] de bonne qualité. En regard aux résultats acoustiques de production et de perception, il semble que la production de valeurs acoustiques F1, F2 et F3 similaires à celles de la condition normale préperturbation ne soit pas nécessaire pour obtenir une compensation complète sur le plan perceptif.

La méthode d'analyse des données articulatoires s'est avérée efficace, en caractérisant de façon appropriée l'espace articulatoire, la forme et la position de la langue à l'aide des

critères sélectionnés. Cependant, une telle technique gagnerait à être utilisée en combinaison avec un système de correction spatiale, ce qui permettrait certainement de réduire partiellement la variabilité observée dans certains cas.

Les résultats de cette étude appuient l'hypothèse selon laquelle le développement de l'articulation compensatoire se fait en même temps que l'enfant apprend à produire des segments phonologiques perceptivement corrects. Les jeunes enfants feraient donc preuve de la même capacité que les adultes à faire des compensations complètes. Cette capacité se développerait parallèlement à leur développement du contrôle moteur de la parole. Afin de renforcer cette dernière hypothèse, il serait particulièrement intéressant de poursuivre l'étude de ce phénomène à l'aide d'autres types de perturbations, ce qui permettrait également de préciser la nature sélective de l'articulation compensatoire. Il serait également pertinent de sonder plus en profondeur l'effet du feedback auditif en instaurant une condition où les informations auditives seraient masquées, permettant ainsi de préciser le rôle des informations proprioceptives et somatosensorielles dans l'élaboration des stratégies compensatoires.

APPENDICE A

ANALYSES STATISTIQUES

Tableau A.1 Résultat des tests de Student pairés pour l'effet de l'instant de mesure sur la condition perturbée (ddl=39) (sujets adultes) (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

Voyelle	Fréquence	t	p
i	f0	-8.889	< 0.001 ***
i	f1	5.98	< 0.001 ***
i	f2	1.413	0.166
i	f3	4.581	< 0.001 ***
i	f4	2.423	0.02 *
y	f0	-4.902	< 0.001 ***
y	f1	2.235	0.031 *
y	f2	1.27	0.212
y	f3	4.633	< 0.001 ***
y	f4	4.528	< 0.001 ***
u	f0	-6.359	< 0.001 ***
u	f1	5.4469	< 0.001 ***
u	f2	5.339	< 0.001 ***
u	f3	0.418	0.678
u	f4	3.444	0.001 **

Tableau A.2 Résultat des tests de Student pairés pour l'effet de l'instant de mesure sur la condition perturbée (ddl=29) (sujets enfants)

Voyelle	Fréquence	t	p
i	f0	1.985	0.057
i	f1	1.583	0.124
i	f2	0.413	0.683
i	f3	0.808	0.426
i	f4	1.098	0.281
y	f0	3.279	0.003 **
y	f1	7.762	< 0.001 ***
y	f2	-1.90	0.067
y	f3	0.098	0.923
y	f4	-0.870	0.392
u	f0	1.102	0.279
u	f1	8.699	< 0.001 ***
u	f2	3.056	0.005 **
u	f3	-0.864	0.395
u	f4	3.343	0.002 **

Tableau A.3 Effet de la condition sur la fréquence fondamentale et les quatre premiers formants (sujets adultes)

Voyelle	Fréquence	f(2,6)	p	n1 / p	n1 / n2	p / n2
i	F0	0.270	0.772	0.616	0.876	0.416
i	F1	0.540	0.608	0.514	0.524	0.518
i	F2	2.057	0.209	0.311	0.072	0.218
i	F3	2.439	0.168	0.018 *	0.603	0.326
i	F4	0.178	0.841	0.894	0.281	0.760
y	F0	0.592	0.583	0.114	0.538	0.846
y	F1	2.471	0.165	0.385	0.417	0.041 *
y	F2	1.055	0.405	0.336	0.712	0.345
y	F3	0.149	0.865	0.723	0.290	0.936
y	F4	0.085	0.920	0.818	0.632	0.889
u	F0	4.559	0.063	0.121	0.079	0.878
u	F1	2.213	0.191	0.819	0.194	0.812
u	F2	0.757	0.509	0.582	0.511	0.361
u	F3	0.126	0.884	0.747	0.782	0.743
u	F4	4.749	0.058	0.315	0.023 *	0.058

Tableau A.4 Effet de la condition sur la fréquence fondamentale et les quatre premiers formants (sujets enfants)

Voyelle	Fréquence	f(2,6)	p	n1 / p	n1 / n2	p / n2
i	F0	0.679	0.542	0.581	0.436	0.212
i	F1	0.498	0.631	0.634	0.406	0.646
i	F2	16.104	0.004 **	0.091 *	0.040 *	0.018 *
i	F3	2.300	0.181	0.201	0.058	0.568
i	F4	7.429	0.024 *	0.016 *	0.159	0.043 *
y	F0	1.644	0.270	0.261	0.175	0.992
y	F1	1.287	0.343	0.876	0.278	0.052
y	F2	0.832	0.480	0.428	0.524	0.347
y	F3	1.182	0.369	0.596	0.453	0.120
y	F4	5.506	0.044 *	0.187	0.031 *	0.072
u	F0	0.215	0.813	0.828	0.601	0.560
u	F1	1.510	0.294	0.930	0.056	18.13
u	F2	0.240	0.794	0.621	0.664	0.798
u	F3	0.310	0.744	0.526	0.662	0.574
u	F4	8.772	0.017	0.643	0.072	0.032 *

Tableau A.5 Effet de la condition sur l'aire des ellipses sur les plans F1/F2 et F2/F3 (sujets adultes)

Voyelle	Plan	f(2,6)	p	n1 / p	n1 / n2	p / n2
i	F1/F2	0.368	0.707	0.728	0.694	0.409
i	F2/F3	0.024	0.976	0.875	0.722	0.967
y	F1/F2	5.971	0.037 *	0.033 *	0.184	0.189
y	F2/F3	1.055	0.405	0.153	0.677	0.461
u	F1/F2	0.105	0.902	0.833	0.577	0.876
u	F2/F3	1.043	0.409	0.373	0.564	0.174

Tableau A.6 Effet de la condition sur l'aire des ellipses sur les plans F1/F2 et F2/F3 (sujets enfants)

Voyelle	Plan	F(2,6)	p	n1 / p	n1 / n2	p / n2
i	F1/F2	1.931	0.225	0.281	0.238	0.340
i	F2/F3	0.420	0.675	0.938	0.365	0.562
y	F1/F2	0.549	0.604	0.409	0.571	0.621
y	F2/F3	1.291	0.342	0.204	0.443	0.567
u	F1/F2	0.383	0.697	0.705	0.516	0.164
u	F2/F3	0.240	0.794	0.581	0.680	0.887

Tableau A.7 Résultats des tests de student concernant l'effet de la condition (p vs n1) sur les paramètres acoustiques, pour chaque locuteur, pour la voyelle [i] (DDL=18, sauf pour les locuteurs BP et JC, où DDL=16)

Sujet		F0		F1		F2		F3		F4	
		t	p	t	p	t	p	t	p	t	p
Adultes	AC	-9.313	< 0.001 ***	23.356	< 0.001 ***	-0.039	0.969	2.686	0.015 *	-1.898	0.074
	AL	5.024	< 0.001 ***	0.765	0.454	1.504	0.150	1.933	0.069	-2.720	0.014 **
	JR	2.206	0.041 *	-0.602	0.555	4.155	0.001 **	1.481	0.156	5.598	< 0.001 ***
	MB	-2.206	0.041 *	-1.438	0.168	-0.370	0.716	3.600	0.002 **	1.816	0.086
Enfants	BP	0.544	0.593	0.180	0.859	1.944	0.068	3.661	0.002 **	3.150	0.006 ***
	JC	-9.100	< 0.001 ***	0.566	0.585	2.056	0.056	1.455	0.164	-0.186	0.855
	LB	-0.166	0.870	-2.611	0.018 *	2.302	0.033 *	3.561	0.002 **	0.513	0.614
	MC	2.206	0.041 *	-0.602	0.555	4.155	0.001 **	1.481	0.156	5.598	< 0.001 ***

Tableau A.8 Résultats des tests de student concernant l'effet de la condition (p vs n1) sur les paramètres acoustiques, pour chaque locuteur, pour la voyelle [y] (DDL=18)

Sujet	F0		F1		F2		F3		F4		
	t	p	t	p	t	p	t	p	t	p	
Adultes	AC	-0.389	0.702	-1.251	0.265	0.704	0.491	-2.459	0.024 *	-1.288	0.214
	AL	0.698	0.494	-3.795	0.001 **	-4.633	< 0.001	-5.006	< 0.001 ***	1.828	0.084
	JR	-9.271	< 0.001 ***	-1.611	0.125	1.086	0.292	7.891	< 0.001 ***	2.049	.055
	MB	-2.684	0.015 *	1.389	0.200	-4.496	< 0.001 ***	-1.738	0.099	-1.749	0.097
Enfants	BP	-4.709	< 0.001 ***	-3.281	0.004 **	4.777	< 0.001 ***	3.445	0.003 **	1.470	0.159
	JC	-1.558	0.137	1.327	0.201	0.304	0.765	-1.31	0.207	0.383	0.706
	LB	1.412	0.175	-0.819	0.423	-1.611	0.125	0.827	0.419	1.209	0.242
	MC	-9.271	< 0.001 ***	-1.611	0.125	1.086	0.292	7.891	< 0.001 ***	2.049	0.055

Tableau A.9 Résultats des tests de student concernant l'effet de la condition sur les paramètres acoustiques, pour chaque locuteur, pour la voyelle [u] (DDL=18)

Sujet		F0		F1		F2		F3		F4	
		t	p	t	p	t	p	t	p	t	p
Adultes	AC	-7.901	< 0.001 ***	1.021	0.321	4.643	< 0.001 ***	-0.761	0.456	-1.059	0.303
	AL	-2.424	0.026 *	-3.988	0.001 **	-1.002	0.330	-1.884	0.076	0.736	0.471
	JR	-13.033	< 0.001 ***	-0.376	0.711	-6.950	< 0.001 ***	0.799	0.446	3.603	0.002 **
	MB	0.708	0.488	2.069	0.053	-3.959	0.001 **	0.237	0.815	0.545	0.592
Enfants	BP	1.105	0.284	-1.326	0.201	0.955	0.352	-2.637	0.017 *	7.916	< 0.001 ***
	JC	-3.711	0.002 **	-0.909	0.376	-1.468	0.159	1.294	0.212	3.117	0.006 **
	LB	2.662	0.016 *	-2.573	0.013 *	-3.822	0.001 **	0.371	0.715	1.085	0.292
	MC	-13.033	< 0.001 ***	-0.651	0.523	-6.950	< 0.001 ***	0.779	0.446	3.603	0.002 **

Tableau A.10 Différences significatives (selon les tests de Student) entre les diverses conditions, pour les paramètres articulatoires de chaque locuteur, pour chaque voyelle

Locuteur	Voyelle	Condition	Y	X	Courbure	Position de la courbure
p						
AC_a	i	n1/n2	0,010	0,878	0,001	0,289
AC_a	i	n1/p	0,327	0,037	0,161	0,010
AC_a	i	n2/p	0,004	0,039	0,006	0,008
AC_a	u	n1/n2	0,870	0,956	0,509	0,048
AC_a	u	n1/p	0,169	0,021	0,041	< 0,001
AC_a	u	n2/p	0,132	0,027	0,016	< 0,001
AC_a	y	n1/n2	0,653	0,416	0,121	0,009
AC_a	y	n1/p	0,890	0,122	0,815	0,066
AC_a	y	n2/p	0,526	0,117	0,044	0,752
AL_a	i	n1/n2	0,938	0,182	0,072	0,590
AL_a	i	n1/p	0,001	0,001	0,003	0,118
AL_a	i	n2/p	0,001	< 0,001	0,039	0,592
AL_a	u	n1/n2	0,104	0,844	0,796	0,199
AL_a	u	n1/p	< 0,001	0,022	0,213	0,176
AL_a	u	n2/p	< 0,001	0,034	0,228	0,012
AL_a	y	n1/n2	0,214	0,759	0,451	0,010
AL_a	y	n1/p	0,041	0,291	< 0,001	< 0,001
AL_a	y	n2/p	0,002	0,421	< 0,001	0,003
JR_a	i	n1/n2	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,293
JR_a	i	n1/p	0,006	< 0,001	0,371	0,001
JR_a	i	n2/p	< 0,001	0,837	< 0,001	< 0,001
JR_a	u	n1/n2	0,456	< 0,001	< 0,001	0,444

JR_a	u	n1/p	0,260	0,007	< 0,001	0,003
JR_a	u	n2/p	0,069	0,524	0,618	0,003
JR_a	y	n1/n2	0,028	0,085	0,979	0,589
JR_a	y	n1/p	0,009	0,041	0,885	0,002
JR_a	y	n2/p	0,269	0,259	0,789	< 0,001
MB_a	i	n1/n2	0,199	0,849	0,643	0,466
MB_a	i	n1/p	0,222	0,370	0,097	0,143
MB_a	i	n2/p	0,015	0,397	0,035	0,056
MB_a	u	n1/n2	0,287	0,247	0,007	0,165
MB_a	u	n1/p	0,006	< 0,001	< 0,001	0,013
MB_a	u	n2/p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,009
MB_a	y	n1/n2	0,029	0,101	0,019	0,170
MB_a	y	n1/p	0,650	0,527	0,682	0,317
MB_a	y	n2/p	0,005	0,039	0,007	0,004
BP_e	i	n1/n2	0,740	0,691	0,003	0,052
BP_e	i	n1/p	0,103	0,022	0,738	0,182
BP_e	i	n2/p	0,202	0,042	0,002	0,225
BP_e	u	n1/n2	< 0,001	0,001	< 0,001	< 0,001
BP_e	u	n1/p	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,001
BP_e	u	n2/p	< 0,001	0,100	< 0,001	0,066
BP_e	y	n1/n2	0,097	< 0,001	< 0,001	< 0,001
BP_e	y	n1/p	0,041	0,357	< 0,001	< 0,001
BP_e	y	n2/p	0,421	0,002	0,078	0,010
JC_e	i	n1/n2	0,055	0,284	< 0,001	< 0,001
JC_e	i	n1/p	< 0,001	0,002	0,001	< 0,001
JC_e	i	n2/p	< 0,001	< 0,001	0,011	0,004
JC_e	u	n1/n2	0,900	0,203	< 0,001	0,013
JC_e	u	n1/p	< 0,001	0,404	< 0,001	0,016
JC_e	u	n2/p	< 0,001	0,058	0,373	0,735
JC_e	y	n1/n2	0,139	< 0,001	< 0,001	< 0,001
JC_e	y	n1/p	0,142	0,038	< 0,001	0,073
JC_e	y	n2/p	0,419	< 0,001	0,157	0,002
LB_e	i	n1/n2	0,026	< 0,001	< 0,001	< 0,001
LB_e	i	n1/p	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001
LB_e	i	n2/p	< 0,001	0,286	0,072	0,006
LB_e	u	n1/n2	0,594	0,171	0,000	0,001
LB_e	u	n1/p	0,655	0,819	< 0,001	< 0,001
LB_e	u	n2/p	0,427	0,150	0,083	0,697
LB_e	y	n1/n2	0,103	0,002	< 0,001	0,018
LB_e	y	n1/p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001
LB_e	y	n2/p	0,013	0,015	0,665	0,537
MC_e	i	n1/n2	0,907	0,045	0,023	0,004
MC_e	i	n1/p	< 0,001	0,246	0,032	0,202
MC_e	i	n2/p	< 0,001	0,001	0,775	0,086

MC_e	u	n1/n2	0,005	0,572	< 0,001	< 0,001
MC_e	u	n1/p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002
MC_e	u	n2/p	< 0,001	< 0,001	0,756	< 0,001
MC_e	y	n1/n2	0,695	0,015	< 0,001	< 0,001
MC_e	y	n1/p	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001
MC_e	y	n2/p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,204

Tableau A.11 Résultats des tests de Student reflétant les différences de la qualité moyenne des répétitions en condition normale préperturbation par rapport à la condition normale postperturbation pour chaque voyelle de chaque locuteur

Sujet	Voyelle					
	[i]		[y]		[u]	
	t	p	t	p	t	p
AC	-2.432	0.041*	-3.391	0.009**	-2.376	0.045*
JR	-0.049	0.962	-3.838	0.005**	-1.071	0.315
MB	-2.074	0.072	0.861	0.414	1.661	0.135
BP	-1.466	0.181	-1.513	0.227	1.283	0.290
JC	-2.676	0.026*	0.399	0.700	0.887	0.401
LB	-4.426	0.002**	2.504	0.041*	-0.702	0.505
MC	-0.496	0.633	1.709	0.124	-3.269	0.011*

APPENDICE B

DONNÉES ACOUSTIQUES

Tableau B.1 Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locuteur AC_a)

V (d)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.	V (m)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.
i	123	298	1796	2994	3849	1	i	190	357	1904	2870	3211	1
i	115	306	1921	2880	3538	1	i	186	358	1867	2852	3409	1
i	133	301	1863	2930	3747	1	i	184	350	1957	3086	3219	1
i	121	284	1843	3204	3733	1	i	183	346	2065	3004	3309	1
i	127	283	1945	3035	4262	1	i	181	353	1991	3038	3333	1
i	127	276	1695	3049	3805	1	i	182	350	1969	3015	3328	1
i	136	238	1818	3007	3704	1	i	181	354	1887	3091	3367	1
i	119	323	1853	2950	3489	1	i	181	360	1936	2946	3357	1
i	154	339	1932	2990	3806	1	i	194	349	1932	2791	3117	1
i	127	338	1915	3109	3478	1	i	189	322	1944	2872	3388	1
i	170	359	1924	3046	3468	2	i	219	257	1967	3010	3435	2
i	156	316	2065	2795	3413	2	i	208	238	1914	2614	3357	2
i	171	332	1896	2610	4235	2	i	216	235	1978	2616	3432	2
i	167	343	1892	3190	3930	2	i	213	238	1930	2481	3403	2
i	166	386	1899	2839	3750	2	i	210	257	1902	2444	3371	2
i	144	314	1935	2727	3425	2	i	207	245	1895	2386	3464	2
i	152	311	2011	2609	3512	2	i	206	237	1950	2978	3355	2
i	145	299	2066	2852	4016	2	i	203	246	2038	2539	3478	2
i	169	297	1931	3230	4251	2	i	210	258	1908	2431	3374	2
i	163	326	1900	3035	3731	2	i	196	237	1979	3300	4461	2
i	129	277	1984	3065	4290	3	i	220	321	1974	3156	3395	3

i	149	298	1854	2913	3513	3	i	206	312	1922	2973	3299	3
i	132	309	1775	2988	3457	3	i	194	333	1982	3060	3458	3
i	149	317	1862	3042	3759	3	i	197	343	1964	3185	3515	3
i	142	409	1979	2917	3916	3	i	192	333	1964	3032	3375	3
i	152	353	1814	3004	3700	3	i	188	309	1907	2989	3331	3
i	167	364	1917	2941	4129	3	i	212	328	1994	3055	3308	3
i	156	375	2045	3380	3667	3	i	198	305	1961	3023	3088	3
i	144	321	1956	2966	3660	3	i	198	318	1980	2971	3291	3
i	153	313	1901	3059	3727	3	i	190	296	1902	2995	3280	3
y	134	310	1738	2741	3630	1	y	175	351	1978	2423	3210	1
y	166	330	1640	2855	3802	1	y	208	311	1989	2406	3311	1
y	146	300	1659	2516	3586	1	y	197	371	2082	2338	3266	1
y	148	322	1878	2677	3967	1	y	188	329	1963	2318	3233	1
y	132	267	1835	2789	3815	1	y	186	319	1749	2664	3253	1
y	220	295	1903	2803	3120	1	y	244	290	1853	2177	3106	1
y	160	330	1765	2703	3512	1	y	218	333	2152	2253	3052	1
y	134	305	1715	2750	3457	1	y	193	306	1776	2352	3124	1
y	131	275	1850	2684	3743	1	y	189	309	1725	2490	3019	1
y	126	281	1882	2886	3893	1	y	176	347	1802	2378	3239	1
y	124	308	1763	2381	3767	2	y	201	348	1803	2502	3218	2
y	123	352	1845	2571	3481	2	y	184	365	1897	2626	3301	2
y	131	337	1889	2816	3803	2	y	186	361	1926	2533	3257	2
y	140	335	1901	2740	3524	2	y	186	359	1933	2703	3183	2
y	136	329	1898	2804	3555	2	y	192	326	1990	2530	3214	2
y	207	345	1850	2595	3354	2	y	261	306	1739	2272	3149	2
y	151	389	1802	2671	3769	2	y	235	321	1854	2740	4132	2
y	129	386	1916	2863	3715	2	y	188	300	1804	2727	3117	2
y	146	363	1834	2574	3758	2	y	198	342	1840	2265	3157	2
y	135	364	1852	2448	3720	2	y	184	364	1915	2576	3366	2
y	173	344	1919	2772	4120	3	y	202	233	1818	2204	3093	3
y	138	265	1918	2620	3950	3	y	184	335	1964	2701	3165	3
y	140	310	2011	2967	3894	3	y	186	223	1767	2428	3092	3
y	122	345	2054	2707	3430	3	y	180	355	1891	2514	3234	3
y	152	343	1878	2580	3429	3	y	188	277	1750	2471	3280	3
y	139	311	1769	2800	3564	3	y	191	301	1806	2401	3161	3
y	142	325	1969	2660	3566	3	y	187	317	1780	2579	3193	3
y	131	346	1668	2678	3786	3	y	190	330	1846	2393	3196	3
y	126	338	1833	2495	3634	3	y	187	268	1792	2275	3108	3
y	139	257	2039	2935	3761	3	y	190	325	1913	2435	3132	3
u	116	374	1087	2283	3278	1	u	182	360	917	2127	2822	1

u	133	350	976	2145	3298	1	u	179	353	993	2000	2958	1
u	134	326	1088	2213	3358	1	u	183	369	899	2066	2914	1
u	155	345	1338	2024	2991	1	u	189	359	936	2029	2816	1
u	143	323	850	2118	3361	1	u	183	336	892	2153	2902	1
u	137	339	1015	2531	3487	1	u	186	355	903	2114	2885	1
u	129	301	1057	2306	3459	1	u	181	355	906	2069	2966	1
u	151	338	1195	2265	3436	1	u	193	378	864	2121	2925	1
u	154	332	1195	2298	3132	1	u	191	329	883	2074	2875	1
u	157	339	997	2230	3123	1	u	195	320	928	1966	2820	1
u	145	348	972	2113	3201	2	u	201	328	777	1993	2828	2
u	154	360	1210	2306	3293	2	u	198	354	853	2211	2861	2
u	142	376	976	2497	3110	2	u	199	367	772	2197	2886	2
u	152	348	987	2257	3207	2	u	204	367	896	2065	2873	2
u	149	345	847	2221	3123	2	u	207	304	815	2059	2836	2
u	139	361	986	2195	3144	2	u	207	339	822	2067	3068	2
u	151	327	1035	2222	3149	2	u	203	341	828	2052	2986	2
u	154	375	1343	2425	3492	2	u	199	335	850	2166	3016	2
u	150	363	882	2139	3133	2	u	200	357	691	2088	2959	2
u	156	336	1187	2192	3302	2	u	205	337	839	2046	2900	2
u	147	316	960	2125	3214	3	u	214	309	677	2025	2762	3
u	122	322	1184	2479	3169	3	u	189	335	800	2079	3107	3
u	151	363	1176	2172	3297	3	u	189	334	773	2005	2940	3
u	163	370	830	2491	3270	3	u	190	341	732	2024	2979	3
u	162	374	1213	2223	3493	3	u	198	309	777	2013	2806	3
u	155	346	800	2254	3257	3	u	190	340	771	2022	2917	3
u	157	349	1212	2176	3224	3	u	190	338	913	2095	3010	3
u	160	356	1200	2251	3508	3	u	198	368	803	2195	3170	3
u	166	348	1028	2146	3192	3	u	198	309	781	2179	2937	3
u	146	366	1025	2186	3369	3	u	191	342	936	2045	2949	3

Tableau B.2 Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice AL_a)

V (d)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.	V (m)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.
i	252	480	2747	3603	4156	1	i	266	448	2661	3554	4280	1
i	253	483	2718	3729	4238	1	i	266	487	2645	3399	4256	1
i	257	521	2621	3608	4177	1	i	265	485	2617	3370	4248	1
i	253	474	2604	3542	4249	1	i	262	484	2587	3382	4160	1
i	238	456	2666	3492	4182	1	i	265	483	2630	3343	4256	1
i	260	424	2646	3624	4143	1	i	265	480	2632	3320	4232	1
i	257	448	2627	3425	4158	1	i	261	489	2587	3362	4182	1

i	218	431	2629	3577	4423	1	i	267	488	2673	3439	4420	1
i	257	425	2736	3601	4245	1	i	268	472	2681	3445	4303	1
i	246	448	2654	3593	4282	1	i	269	497	2695	3443	4272	1
i	247	433	2509	3675	4165	2	i	255	471	2562	3155	4296	2
i	221	478	2526	3359	4250	2	i	247	460	2601	3283	4197	2
i	231	522	2725	3600	4501	2	i	251	430	2537	3631	4737	2
i	232	459	2570	3405	4152	2	i	255	506	2552	3405	4361	2
i	242	468	2765	3414	4391	2	i	257	506	2563	3006	4615	2
i	257	499	2778	3268	4106	2	i	257	503	2668	3090	4405	2
i	267	447	2620	3555	4399	2	i	260	460	2619	3339	4247	2
i	225	490	2551	3764	4504	2	i	266	474	2669	3353	4328	2
i	244	497	2735	3645	4388	2	i	257	468	2699	3173	4582	2
i	237	479	2637	3315	4282	2	i	259	468	2618	3422	4459	2
i	252	462	2711	3874	4401	3	i	256	465	2727	3554	4286	3
i	242	474	2719	3643	4395	3	i	258	468	2764	3559	4336	3
i	257	416	2713	3688	4293	3	i	262	510	2604	3540	4343	3
i	253	459	2749	3622	4244	3	i	262	499	2633	3449	4323	3
i	227	454	2589	3697	4289	3	i	257	461	2631	3447	4520	3
i	257	450	2623	3813	4454	3	i	263	475	2616	3477	4490	3
i	223	483	2647	3670	4107	3	i	262	497	2600	3385	4163	3
i	265	444	2778	3707	4379	3	i	253	455	2614	3459	4304	3
i	275	465	2739	3718	4537	3	i	257	457	2590	3375	4487	3
i	257	502	2625	3765	4368	3	i	264	460	2643	3337	4510	3
y	246	468	2252	2624	3680	1	y	270	349	2138	2538	3768	1
y	220	438	2180	2242	3742	1	y	272	337	1930	2512	3781	1
y	217	427	2105	2623	3815	1	y	272	356	1951	2473	3681	1
y	266	417	2180	2497	3694	1	y	273	398	1939	2442	3792	1
y	265	401	2091	2600	3739	1	y	263	445	2034	2577	3743	1
y	256	441	2151	2712	3771	1	y	273	395	1906	2533	3801	1
y	236	450	2190	2754	3757	1	y	273	420	1992	2593	3852	1
y	277	430	2208	2691	3744	1	y	273	421	2060	2693	3800	1
y	242	449	2303	2586	3759	1	y	270	378	2089	2500	3862	1
y	263	374	2161	2538	3708	1	y	269	372	2122	2587	3772	1
y	248	451	2242	2821	3745	2	y	265	434	2243	2645	3644	2
y	356	400	2215	3015	3673	2	y	266	441	2182	2704	3725	2
y	275	461	2305	2890	3941	2	y	268	428	2157	2685	3738	2
y	275	418	2187	2711	3877	2	y	273	431	2123	2656	3956	2
y	279	441	2274	2751	4035	2	y	266	456	2129	2674	3799	2
y	270	464	2194	2843	3906	2	y	268	440	2140	2651	3760	2
y	288	428	2217	2913	3901	2	y	275	442	2094	2721	3563	2
y	271	458	2207	2826	3599	2	y	269	411	2146	2724	3626	2
y	277	414	2107	2672	3961	2	y	271	447	2155	2609	3655	2
y	236	484	2117	2620	3712	2	y	276	403	2167	2652	3685	2
y	266	435	2128	2479	3743	3	y	282	404	2078	2632	3886	3
y	261	459	2047	2592	3767	3	y	285	417	2010	2546	3739	3

y	224	433	2196	2693	3733	3	y	272	435	1945	2652	3804	3
y	269	408	2046	2692	3702	3	y	279	392	2037	2552	3805	3
y	241	441	2183	2777	3825	3	y	288	451	1997	2498	3739	3
y	282	448	2173	2778	3712	3	y	286	430	2116	2719	3509	3
y	263	416	2316	2716	3876	3	y	289	420	2004	2525	3783	3
y	277	409	2109	2649	3885	3	y	282	363	2189	2536	3537	3
y	290	418	2241	2742	3798	3	y	291	412	2139	2664	3647	3
y	239	475	2118	2683	3724	3	y	289	386	2137	2510	3701	3
u	278	646	882	2838	3972	1	u	306	383	917	2666	3854	1
u	281	524	969	2877	4003	1	u	308	353	930	2855	4127	1
u	281	467	928	2479	4010	1	u	308	381	936	2794	4075	1
u	246	513	956	2722	3832	1	u	310	369	934	2755	4004	1
u	266	625	955	2954	4077	1	u	310	404	947	2730	4102	1
u	271	539	984	2815	4323	1	u	304	368	925	2673	4006	1
u	256	597	889	2729	3818	1	u	314	384	946	2790	4097	1
u	261	544	828	2497	4105	1	u	308	410	911	2590	3986	1
u	261	568	899	2222	3969	1	u	318	365	987	2777	4131	1
u	290	445	860	2635	4097	1	u	310	381	946	2803	4158	1
u	269	524	948	2662	3986	2	u	313	464	950	2794	3916	2
u	307	522	895	2922	4014	2	u	317	385	968	2691	4020	2
u	262	519	1077	2827	3966	2	u	317	426	980	2781	4078	2
u	256	555	983	2722	3955	2	u	322	395	968	2812	3890	2
u	267	542	1163	2741	3967	2	u	309	530	878	2786	3995	2
u	255	541	983	2648	3977	2	u	326	426	969	2886	3985	2
u	238	569	892	2585	3901	2	u	306	549	996	2782	4170	2
u	235	626	948	2543	3987	2	u	317	415	935	2840	4069	2
u	261	546	1019	2585	4041	2	u	312	539	933	2820	4015	2
u	289	566	1123	2641	3881	2	u	312	467	928	2799	4110	2
u	250	538	852	2550	4015	3	u	321	342	930	2807	4268	3
u	283	550	948	2469	3947	3	u	320	355	968	2629	4169	3
u	262	588	776	2498	4096	3	u	322	363	952	2849	3910	3
u	268	524	951	2640	3985	3	u	322	359	978	2796	4260	3
u	272	529	1042	2496	3830	3	u	321	363	991	2540	4173	3
u	266	471	1028	2752	3972	3	u	318	357	1017	2685	4143	3
u	276	553	1008	2236	3978	3	u	321	351	999	2680	4213	3
u	264	557	902	2659	4074	3	u	322	337	959	2890	4212	3
u	258	461	855	2565	3996	3	u	317	343	976	2740	3963	3
u	267	474	747	2517	3684	3	u	320	342	973	2719	3865	3

Tableau B.3 Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice JR_a)

V (d)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.	V (m)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.
i	278	362	2649	3318	4330	1	i	326	341	2465	2849	4585	1

i	274	369	2694	3660	4658	1	i	326	345	2745	3239	4625	1
i	266	379	2690	3458	4398	1	i	329	356	2604	3307	4590	1
i	284	360	2559	3659	4622	1	i	337	363	2653	2740	4686	1
i	256	369	2523	3724	4763	1	i	324	345	2603	3517	4717	1
i	289	337	2626	3224	4343	1	i	326	352	2648	3381	4594	1
i	236	400	2499	3289	4509	1	i	328	368	2645	3350	4612	1
i	249	397	2575	3223	4394	1	i	327	355	2619	3340	4542	1
i	284	463	2674	3637	4813	1	i	332	375	2635	3337	4587	1
i	267	383	2619	3066	4325	1	i	321	343	2502	3176	4662	1
i	278	447	2456	2794	4222	2	i	321	358	2442	2896	4241	2
i	278	485	2582	3381	4493	2	i	322	365	2530	3187	4547	2
i	267	480	2562	3226	4362	2	i	326	352	2442	3051	4243	2
i	255	507	2514	3314	4836	2	i	321	351	2466	3108	4350	2
i	244	440	2485	3261	4543	2	i	323	354	2466	3107	4410	2
i	249	467	2594	3226	4342	2	i	325	361	2532	3141	4252	2
i	285	424	2498	3225	4435	2	i	319	339	2483	3164	4474	2
i	274	521	2490	2857	4391	2	i	329	359	2563	2872	4227	2
i	250	471	2505	3272	4512	2	i	319	350	2444	3170	4483	2
i	278	438	2475	3127	4456	2	i	330	386	2545	3257	4522	2
i	270	327	2715	3825	4703	3	i	313	358	2540	2792	4711	3
i	277	469	2600	3377	4674	3	i	322	339	2620	3083	4777	3
i	281	375	2713	3659	4697	3	i	315	365	2756	2768	4720	3
i	286	421	2655	3863	4794	3	i	319	343	2446	2799	4770	3
i	275	368	2670	3727	4763	3	i	317	357	2627	2687	4749	3
i	276	433	2637	3700	4779	3	i	321	350	2616	2803	4791	3
i	254	363	2591	3168	4280	3	i	306	360	2682	3684	4717	3
i	267	416	2637	3799	4858	3	i	317	350	2641	3185	4767	3
i	238	485	2595	3782	4822	3	i	317	357	2758	2885	4718	3
i	277	360	2780	3806	4764	3	i	318	341	2664	2778	4728	3
y	223	377	2175	2597	4101	1	y	269	407	2206	2583	4129	1
y	268	379	2252	2702	4165	1	y	269	451	2151	2662	4136	1
y	218	397	2316	2875	4333	1	y	266	435	2195	2623	4086	1
y	237	368	2235	2712	4248	1	y	268	399	2196	2662	4080	1
y	263	383	2240	2782	4217	1	y	263	412	2214	2636	4004	1
y	229	373	2336	2834	4294	1	y	263	392	2240	2658	4051	1
y	237	403	2237	2753	4245	1	y	259	415	2283	2669	4256	1
y	242	390	2213	2711	4104	1	y	260	436	2260	2594	4226	1
y	239	387	2202	2610	4067	1	y	268	395	2134	2608	4199	1
y	240	354	2268	2812	4193	1	y	266	405	2162	2635	4037	1
y	260	397	2329	2612	4186	2	y	279	425	2227	2522	3993	2

y	266	443	2204	2497	4210	2	y	276	428	2190	2424	4014	2
y	254	413	2179	2872	4112	2	y	275	419	2176	2525	3932	2
y	246	495	2136	2607	4183	2	y	275	439	2145	2418	4015	2
y	242	389	2248	2825	4062	2	y	276	407	2182	2321	4044	2
y	251	379	2220	2595	4211	2	y	277	425	2194	2433	3992	2
y	257	395	2194	2663	4153	2	y	280	426	2227	2437	4068	2
y	252	446	2327	2660	4141	2	y	278	413	2194	2364	4127	2
y	257	473	2099	2505	4341	2	y	277	446	2099	2345	4218	2
y	229	449	2172	2677	4237	2	y	276	436	2198	2247	4048	2
y	279	335	2188	2716	4031	3	y	287	401	2283	2835	4285	3
y	262	402	2189	2690	4166	3	y	286	402	2251	2700	4135	3
y	232	403	2285	2647	4069	3	y	284	416	2247	2790	4313	3
y	255	344	2215	2706	4007	3	y	279	382	2218	2756	4276	3
y	206	382	2266	2756	4135	3	y	286	395	2286	2525	4124	3
y	259	408	2310	2637	4084	3	y	286	393	2263	2823	4267	3
y	258	427	2133	2607	4135	3	y	290	398	2280	2769	4157	3
y	265	391	2172	2672	4166	3	y	283	415	2212	2820	4390	3
y	270	417	2193	2689	4094	3	y	286	394	2270	2859	4485	3
y	236	404	2271	2718	4106	3	y	286	409	2266	2719	4217	3
u	266	485	824	2382	4151	1	u	291	439	818	2485	4216	1
u	261	428	938	2646	4309	1	u	295	437	889	2842	4553	1
u	269	430	835	2661	4165	1	u	296	400	890	2869	4288	1
u	254	510	1154	2619	4401	1	u	297	401	899	2806	4445	1
u	246	447	643	2772	4104	1	u	297	406	898	2934	4523	1
u	259	468	880	2673	4066	1	u	292	426	863	2874	4416	1
u	220	491	980	2796	4277	1	u	301	379	910	2805	4308	1
u	261	488	861	2302	4007	1	u	302	360	915	2758	4355	1
u	253	439	928	2749	4092	1	u	299	371	903	2535	4161	1
u	258	453	805	2701	3749	1	u	301	369	907	2578	4180	1
u	292	429	1063	2616	4160	2	u	312	432	938	2693	4073	2
u	265	513	1197	2644	4105	2	u	319	387	967	2707	4150	2
u	283	528	939	2499	4180	2	u	315	419	956	2613	4096	2
u	281	513	993	2725	4278	2	u	317	401	956	2707	4132	2
u	283	422	995	2860	4250	2	u	317	396	961	2700	4130	2
u	286	433	1033	2808	4274	2	u	316	409	961	2757	4153	2
u	279	447	1057	2687	4226	2	u	317	388	965	2742	4234	2
u	272	502	1007	2793	4300	2	u	315	416	954	2770	4330	2
u	262	394	857	2757	4204	2	u	311	385	943	2702	4064	2
u	270	473	1018	2541	4214	2	u	316	394	958	2692	4239	2
u	352	483	1302	2754	4482	3	u	313	401	901	2662	4461	3

u	283	461	926	2534	4251	3	u	312	420	923	2731	4364	3
u	235	467	1111	2659	4207	3	u	315	389	943	2721	4404	3
u	295	491	1351	2627	3799	3	u	315	378	934	2819	4397	3
u	277	402	1026	2983	4585	3	u	312	387	939	3048	4480	3
u	275	434	971	2565	3756	3	u	318	432	964	2702	4341	3
u	274	449	862	3375	4404	3	u	311	384	914	2644	4367	3
u	291	425	1143	2723	4165	3	u	315	412	936	2758	4225	3
u	284	490	1468	3501	4719	3	u	317	375	945	2818	4408	3
u	281	483	1013	2831	4049	3	u	315	380	940	2715	4181	3

Tableau B.4 Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice MB_a)

V (d)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.	V (m)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.
i	203	364	2694	3849	4535	1	i	210	323	2740	3658	4255	1
i	199	307	2765	3775	4466	1	i	209	354	2790	3737	4288	1
i	211	307	2693	3781	4270	1	i	206	356	2700	3814	4344	1
i	202	387	2663	3766	4426	1	i	211	284	2731	3747	4175	1
i	189	347	2725	3771	4495	1	i	210	317	2786	3777	4285	1
i	205	282	2669	3803	4378	1	i	211	304	2759	3813	4539	1
i	239	337	2626	3638	4660	1	i	202	260	2677	3555	4345	1
i	201	234	2519	3822	4401	1	i	210	393	2839	3938	4307	1
i	204	342	2736	3812	4558	1	i	212	275	2773	3684	4273	1
i	190	381	2701	3781	4422	1	i	214	333	2776	3652	4332	1
i	202	405	2820	3795	4348	2	i	208	373	2783	3379	4263	2
i	203	346	2784	3801	4620	2	i	207	380	2694	3534	4151	2
i	199	410	2688	3716	4321	2	i	213	335	2797	3631	4279	2
i	195	338	2776	3760	4510	2	i	212	297	2731	3606	4159	2
i	204	377	2693	3696	4365	2	i	216	353	2800	3550	4225	2
i	198	337	2825	3698	4637	2	i	217	339	2758	3534	4237	2
i	215	401	2775	3699	4372	2	i	212	299	2740	3679	4295	2
i	198	296	2718	3782	4535	2	i	211	320	2723	3523	4258	2
i	215	325	2877	3793	4571	2	i	218	372	2898	3678	4264	2
i	203	417	2748	3800	4499	2	i	216	363	2734	3652	4365	2
i	199	350	2677	3700	4402	3	i	212	275	2750	3603	4209	3
i	212	394	2449	3683	4404	3	i	214	295	2737	3678	4187	3
i	212	364	2714	3797	4475	3	i	214	304	2770	3756	4274	3
i	218	359	2799	3790	4369	3	i	213	353	2767	3672	4234	3
i	203	340	2630	3859	4411	3	i	221	368	2758	3654	4209	3

i	211	313	2791	3839	4437	3	i	217	366	2826	3667	4223	3
i	217	356	2852	3813	4475	3	i	215	339	2806	3731	4360	3
i	223	326	2810	3686	4444	3	i	212	292	2759	3741	4359	3
i	216	360	2616	3651	4512	3	i	217	378	2807	3657	4351	3
i	199	240	2721	3776	4399	3	i	216	356	2796	3685	4207	3
y	216	363	2420	2720	3678	1	y	215	341	2351	2610	3671	1
y	221	384	2260	2691	3631	1	y	216	312	2400	2520	3665	1
y	206	383	2110	2757	3657	1	y	212	289	2304	2721	3687	1
y	221	345	2136	2655	3671	1	y	210	352	2273	2595	3872	1
y	215	388	2324	2686	3735	1	y	218	373	2410	2732	3676	1
y	195	319	2383	3059	3732	1	y	199	322	2330	2596	3568	1
y	196	305	2176	2993	3816	1	y	202	325	2451	2886	3580	1
y	215	365	1911	2642	3652	1	y	215	359	2369	2683	3531	1
y	219	351	2277	2707	3677	1	y	234	419	2150	2508	3531	1
y	204	352	2309	2800	3653	1	y	215	416	2360	2774	3623	1
y	222	387	2491	2723	3598	2	y	241	321	2467	2784	3651	2
y	206	345	2512	2733	3690	2	y	222	327	2472	2666	3580	2
y	211	364	2443	2700	3698	2	y	221	313	2453	2699	3756	2
y	208	335	2420	2761	3646	2	y	226	347	2466	2764	3623	2
y	177	349	2451	2665	3679	2	y	215	343	2569	2778	3754	2
y	208	379	2449	2890	3818	2	y	218	324	2407	2698	3745	2
y	197	375	2529	2835	3703	2	y	219	336	2507	2696	3713	2
y	212	350	2384	2601	3729	2	y	224	317	2471	2892	3804	2
y	213	367	2395	2622	3675	2	y	228	352	2432	2696	3712	2
y	214	347	2588	3053	3792	2	y	223	340	2522	2703	3743	2
y	221	274	2351	2540	3679	3	y	209	356	2038	2665	3716	3
y	195	388	2413	2581	3723	3	y	208	286	2101	2471	3568	3
y	197	335	2200	2642	3674	3	y	208	349	2223	2639	3753	3
y	202	399	2427	2795	3651	3	y	200	328	2246	2649	3646	3
y	194	258	2561	2746	3610	3	y	207	268	2286	2655	3681	3
y	154	349	2428	2777	3578	3	y	208	337	2248	2622	3725	3
y	198	402	2325	2762	3678	3	y	206	351	2361	2690	3730	3
y	176	372	2186	2533	3641	3	y	211	363	2359	2482	3684	3
y	194	358	2243	2615	3744	3	y	212	287	2366	2538	3627	3
y	194	370	2286	2876	3708	3	y	215	318	2245	2767	3661	3
u	222	463	709	2809	3814	1	u	213	354	611	2746	3798	1
u	212	389	809	2776	3818	1	u	214	323	603	2571	3284	1
u	189	393	863	2798	3765	1	u	216	432	894	2627	3713	1
u	206	340	796	2664	3669	1	u	227	404	651	2774	3597	1
u	218	452	983	2833	3794	1	u	216	365	700	2816	3748	1

u	194	423	929	2976	3645	1	u	228	446	663	2917	3733	1
u	208	359	845	3009	3800	1	u	225	455	845	2834	3761	1
u	221	358	800	2809	3795	1	u	222	387	644	2821	3707	1
u	107	387	1012	2772	3924	1	u	220	389	738	2905	3869	1
u	200	390	796	2846	3596	1	u	217	403	898	3114	3927	1
u	181	419	996	2663	3733	2	u	224	246	872	2660	3594	2
u	204	386	1015	2732	3714	2	u	211	262	857	2713	3595	2
u	228	366	1000	2787	3714	2	u	217	333	840	2847	3295	2
u	214	376	1009	2924	3829	2	u	219	366	871	2841	3758	2
u	342	371	932	2887	3823	2	u	220	290	872	2834	3644	2
u	197	374	932	2774	3777	2	u	214	386	870	2826	3820	2
u	217	416	928	2825	3651	2	u	217	395	861	2823	3804	2
u	229	379	821	2839	3747	2	u	218	419	881	2829	3752	2
u	198	399	932	2794	3788	2	u	223	400	855	2785	3703	2
u	224	394	933	2789	3792	2	u	220	376	926	2843	3767	2
u	279	322	875	2833	3591	3	u	220	316	645	2819	3788	3
u	220	362	718	2745	3746	3	u	214	304	633	3132	3772	3
u	222	405	646	2851	3343	3	u	215	418	656	2653	3578	3
u	212	372	883	2881	3808	3	u	218	338	609	2617	3629	3
u	192	373	751	2743	3879	3	u	222	404	754	2889	3815	3
u	219	383	1051	3120	3810	3	u	221	297	646	2732	3771	3
u	215	347	776	2903	3823	3	u	221	330	609	2754	3792	3
u	193	371	832	2750	3965	3	u	220	360	662	2855	3925	3
u	204	421	970	2925	3774	3	u	224	381	615	2728	3843	3
u	220	365	959	3064	3894	3	u	221	394	548	2860	3687	3

Tableau B.5 Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice BP_e)

V (d)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.	V (m)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.
i	235	504	2822	4206	5238	1	i	253	537	3091	3828	5340	1
i	236	487	2960	3908	4966	1	i	260	455	2364	4108	5177	1
i	223	481	3255	3934	5105	1	i	266	463	3206	4017	4915	1
i	227	458	2945	3703	4452	1	i	239	539	3177	3896	5281	1
i	190	564	3190	3958	5053	1	i	266	466	3055	3835	4922	1
i	214	439	3045	4205	5263	1	i	255	433	3403	4248	5259	1
i	234	497	3292	4101	5291	1	i	285	517	3508	4038	5065	1
i	237	555	3008	3912	5137	1	i	274	516	3206	3794	5211	1
i	238	457	3093	3512	4146	1	i	269	454	2427	3909	4489	1
i	278	474	2691	3333	4861	2	i	249	589	3027	3516	4628	2

i	265	425	2215	3237	4788	2	i	242	513	2880	3414	4627	2
i	247	485	3125	3221	4918	2	i	271	527	2787	3640	4915	2
i	263	511	3046	3811	4673	2	i	270	476	3131	3284	4754	2
i	243	474	2272	2929	4502	2	i	261	412	2450	3089	4416	2
i	282	487	2655	3143	4307	2	i	271	488	2481	3327	4527	2
i	212	513	3062	3697	4715	2	i	262	423	2383	4116	5037	2
i	270	490	3014	3755	4547	2	i	258	501	2478	2865	4758	2
i	270	477	2940	3553	4700	2	i	274	483	2842	3883	4779	2
i	253	472	3056	3429	4697	2	i	274	519	3073	3804	4809	2
i	275	503	3056	4073	5166	3	i	282	500	3084	3983	5215	3
i	276	460	3201	3873	5223	3	i	261	519	3192	3867	5333	3
i	243	508	3105	3942	5149	3	i	257	455	3245	3985	4741	3
i	232	485	3085	4034	5255	3	i	268	455	3073	3993	5346	3
i	260	478	3054	4191	5285	3	i	271	501	2983	3967	5149	3
i	255	470	3074	3818	5132	3	i	249	489	2989	3762	5038	3
i	244	451	2749	3275	4133	3	i	253	448	3085	4112	5038	3
i	244	441	2996	3929	5235	3	i	259	458	3147	4156	5206	3
i	243	450	3161	3818	4939	3	i	264	473	3260	3892	5222	3
i	266	430	2979	3941	4311	3	i	258	454	2464	3666	4835	3
y	269	424	2258	3049	4474	1	y	265	478	2781	3466	4619	1
y	284	484	2613	3197	4280	1	y	268	504	2708	3445	5078	1
y	225	504	2611	3320	4396	1	y	257	449	2858	3094	4381	1
y	268	493	2662	3314	4259	1	y	262	430	2246	3394	4321	1
y	247	487	2655	3305	4505	1	y	269	462	2603	3205	3930	1
y	284	408	2442	3179	4307	1	y	272	456	2468	3048	4368	1
y	248	401	2649	3383	4568	1	y	259	402	2487	3010	4489	1
y	272	455	2608	3274	4430	1	y	262	412	2668	3278	4298	1
y	251	472	2374	3033	4352	1	y	262	473	2443	2655	4351	1
y	234	473	2345	3046	4430	1	y	259	416	2655	2892	4143	1
y	274	564	2279	2911	4261	2	y	281	556	2452	3225	4509	2
y	243	524	2150	2779	4305	2	y	296	463	2566	2744	4225	2
y	259	524	1807	3094	4132	2	y	284	529	2265	2871	4207	2
y	266	549	1806	2818	4249	2	y	272	466	1959	2699	4278	2
y	282	565	2129	2769	4216	2	y	263	511	2293	2654	4158	2
y	265	539	2131	2666	4186	2	y	268	512	1971	2652	4172	2
y	271	550	1950	2774	4353	2	y	282	488	2074	2815	4207	2
y	264	470	2199	3139	4229	2	y	291	451	2034	2916	4268	2
y	244	525	1706	2970	4355	2	y	280	522	2009	2738	4243	2
y	271	527	2267	2915	4283	2	y	289	474	2047	2787	4233	2
y	266	379	2207	3052	4467	3	y	271	464	2720	2848	4533	3

y	270	454	2619	3184	4538	3	y	270	445	2319	2894	4560	3
y	260	454	1784	3126	4501	3	y	265	499	2903	2945	4490	3
y	250	458	2077	3130	4505	3	y	272	483	2276	2975	4490	3
y	244	427	2623	3050	4565	3	y	293	452	2428	2838	4519	3
y	228	534	2454	2925	4299	3	y	278	512	2865	3078	4514	3
y	268	471	2587	2825	4604	3	y	273	467	2494	2825	4437	3
y	258	495	2250	2934	4402	3	y	278	510	2876	3152	4558	3
y	274	508	2578	3130	4532	3	y	277	509	2506	2911	4423	3
y	244	465	2160	3204	4357	3	y	284	523	2512	2942	4411	3
u	233	531	882	4023	4556	1	u	253	539	1421	3105	4485	1
u	247	545	949	3916	4920	1	u	281	561	1470	3442	4738	1
u	239	496	966	3805	4678	1	u	282	555	1177	3461	4598	1
u	253	501	1095	3766	4671	1	u	275	540	1142	3486	4793	1
u	237	476	986	3953	4956	1	u	257	557	1314	3525	5000	1
u	254	543	871	3428	4201	1	u	276	534	1080	3126	4711	1
u	230	460	950	3617	4829	1	u	271	492	985	3184	4615	1
u	220	473	930	3638	4501	1	u	256	545	1393	3271	4663	1
u	225	515	1106	3882	4774	1	u	253	529	1061	3049	4312	1
u	215	649	1012	3625	4113	2	u	263	520	1011	3666	4070	2
u	213	694	1241	3259	4035	2	u	240	519	1071	3501	4237	2
u	254	658	1185	3641	4173	2	u	252	667	961	3669	4159	2
u	273	649	1141	3542	3926	2	u	243	658	994	3967	4018	2
u	305	739	1249	3124	4079	2	u	246	648	952	3471	4039	2
u	231	545	964	3781	4374	2	u	277	512	961	3819	4312	2
u	222	664	990	3766	4374	2	u	259	563	1163	3842	4078	2
u	259	696	1070	3851	4119	2	u	278	553	1025	3716	3979	2
u	245	665	1057	3046	4027	2	u	251	597	1074	3671	4090	2
u	247	731	1242	3401	4174	2	u	262	550	996	3542	4133	2
u	248	468	853	3196	4956	3	u	256	554	987	3761	5245	3
u	269	502	970	3529	4446	3	u	277	530	1096	3453	4657	3
u	275	491	1070	3603	4556	3	u	273	549	1135	3456	4604	3
u	245	537	1021	3541	4701	3	u	270	541	1083	3042	4459	3
u	257	559	1002	3676	4701	3	u	258	532	1097	3035	4536	3
u	230	542	1068	3673	4683	3	u	252	513	1055	3192	4597	3
u	246	529	1085	3238	4301	3	u	263	517	1107	3164	4305	3
u	241	555	1163	3531	4592	3	u	255	509	1064	3115	4379	3
u	246	489	1040	3657	4519	3	u	264	473	1010	3606	4164	3
u	232	555	1072	3696	4489	3	u	271	521	1103	3209	4230	3

Tableau B.6 Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locuteur JC_e)

V (d)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.	V (m)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.
i	373	482	3367	4290	5480	1	i	296	380	3620	4138	5418	1
i	353	413	3273	4313	5656	1	i	289	376	3376	4528	5216	1
i	345	471	3459	5003	5787	1	i	307	401	3029	4580	5213	1
i	314	461	3427	4279	5737	1	i	296	485	2793	4071	5525	1
i	329	436	3450	4191	5547	1	i	302	454	3149	4171	5680	1
i	314	417	2990	4517	5269	1	i	289	381	2962	4320	5183	1
i	317	385	3858	4558	5412	1	i	300	450	3847	4307	5156	1
i	336	393	3409	4032	5539	1	i	286	366	3185	4512	5445	1
i	323	377	3166	4190	5374	1	i	290	445	3626	3914	5496	1
i	364	432	2173	4442	5083	2	i	315	444	2450	4322	5847	2
i	389	461	2854	4225	5770	2	i	325	405	3005	4150	5763	2
i	347	468	3123	3617	5436	2	i	354	383	2954	4002	5437	2
i	362	470	3120	4311	5710	2	i	352	369	3177	4125	5328	2
i	367	449	3408	4457	5199	2	i	341	393	3075	4165	4885	2
i	372	450	2968	3385	4926	2	i	347	398	2984	3868	5556	2
i	348	475	3427	4805	5967	2	i	327	437	3005	4246	5618	2
i	360	474	3062	4416	6068	2	i	343	404	3186	4190	5401	2
i	381	485	3083	4819	6170	2	i	336	412	3037	4269	4713	2
i	364	466	3609	4378	6104	2	i	346	421	3257	4248	5401	2
i	343	474	3271	4588	5652	3	i	324	415	3176	4071	5647	3
i	370	487	3322	4348	5820	3	i	320	414	3045	4101	5410	3
i	359	497	3886	3923	5802	3	i	321	437	3449	3760	5473	3
i	384	461	3451	4148	5709	3	i	329	425	3323	3975	5431	3
i	380	466	3797	3881	5842	3	i	326	423	3328	3808	5550	3
i	388	443	3429	3894	5662	3	i	343	429	3179	3993	5518	3
i	396	496	3465	4246	5601	3	i	333	441	3331	4025	5208	3
i	389	443	3257	3863	5569	3	i	331	467	3431	3973	5596	3
i	379	445	3748	4047	5696	3	i	336	433	3737	4259	5516	3
i	375	486	3027	3999	5520	3	i	325	427	3194	3822	5407	3
y	388	402	2708	3246	4590	1	y	339	365	2545	3157	4532	1
y	367	419	2795	3387	4348	1	y	339	375	2687	3335	4846	1
y	378	456	2664	3229	4680	1	y	339	366	2531	2986	4432	1
y	426	444	2701	3345	4779	1	y	346	391	2723	3142	4623	1
y	419	457	2648	3287	4579	1	y	346	409	2664	2985	4513	1
y	438	484	2689	3391	4878	1	y	336	401	2681	3535	4800	1
y	242	515	2599	3369	4738	1	y	338	407	2661	3326	4911	1
y	418	474	2689	3331	4597	1	y	347	405	2712	3317	4568	1

y	402	459	2565	3269	4650	1	y	340	401	2681	3263	5107	1
y	415	473	2747	3401	4730	1	y	333	391	2631	3305	4949	1
y	364	404	2453	3819	4595	2	y	354	372	2378	3159	4635	2
y	409	463	2955	3548	4654	2	y	343	393	2390	3181	4554	2
y	432	463	2783	3229	4282	2	y	341	378	2616	3132	4139	2
y	374	442	2887	4066	5724	2	y	334	360	2769	3198	4725	2
y	428	450	2548	3797	5222	2	y	335	396	2554	2887	4614	2
y	409	453	2669	4063	5498	2	y	338	367	2707	4357	5805	2
y	414	457	2840	3282	4383	2	y	342	374	2761	3658	4504	2
y	425	465	2736	3470	4696	2	y	360	403	2542	3186	4649	2
y	408	492	2667	3112	4996	2	y	350	399	2515	3523	4541	2
y	402	428	2594	3790	4379	2	y	357	375	3075	4229	4528	2
y	371	401	2795	3840	4448	3	y	328	350	2756	2968	4845	3
y	383	416	2397	3562	4614	3	y	334	349	2158	2933	5101	3
y	406	500	2385	3465	4647	3	y	338	355	2373	3065	4370	3
y	384	449	2665	3527	4649	3	y	335	361	2488	4087	5500	3
y	393	530	2438	3442	4723	3	y	336	370	2669	4012	4386	3
y	431	488	2423	3382	4824	3	y	336	379	2722	3683	4658	3
y	405	446	2676	3425	4607	3	y	336	391	2642	4476	5445	3
y	434	455	2347	3129	4513	3	y	340	379	2905	4454	5444	3
y	403	424	2566	3398	4494	3	y	331	377	2696	4286	5501	3
y	390	426	2648	3507	4553	3	y	329	375	2688	4287	5561	3
u	448	430	1255	3673	5275	1	u	339	366	1040	4158	4726	1
u	426	676	931	3551	5471	1	u	365	425	1154	4072	5101	1
u	435	483	1142	3481	5116	1	u	346	372	1041	4152	5666	1
u	436	520	1338	3437	5242	1	u	356	414	1128	3922	4810	1
u	394	651	1104	3582	5270	1	u	355	366	1087	3814	5065	1
u	418	571	1342	3476	5167	1	u	362	396	1112	3969	5442	1
u	412	455	1188	3481	5441	1	u	358	457	1104	3852	5362	1
u	419	681	1474	4024	5644	1	u	344	329	1034	3965	5094	1
u	421	603	1276	3930	5642	1	u	353	464	1245	3681	4912	1
u	436	599	1278	3781	5587	1	u	352	431	1109	3730	5432	1
u	227	548	1373	3770	5696	2	u	389	424	1282	3674	4625	2
u	425	554	1084	4006	5365	2	u	374	413	1178	3385	4861	2
u	239	460	1108	3436	4845	2	u	354	411	1080	3856	4701	2
u	431	574	1115	3824	4848	2	u	368	425	1123	3836	4791	2
u	248	545	1298	3562	4659	2	u	376	424	1165	3882	4816	2
u	235	581	1269	3768	4682	2	u	362	428	1101	3972	5073	2
u	272	578	1224	3540	4891	2	u	370	391	1150	3578	4811	2
u	272	659	1332	3831	4931	2	u	356	419	1088	3917	4852	2

u	221	652	1169	3176	4231	2	u	364	411	1114	4045	4848	2
u	231	616	1143	3369	4656	2	u	370	404	1178	4061	4976	2
u	435	701	1257	3410	4857	3	u	385	464	1312	3870	5443	3
u	443	669	892	4023	5841	3	u	373	511	1377	3885	5210	3
u	433	622	968	3673	5445	3	u	368	514	1251	4308	5448	3
u	379	733	1068	3907	5654	3	u	379	453	1154	3778	4812	3
u	408	619	1133	3609	5404	3	u	368	430	1171	4057	5504	3
u	394	567	893	3676	5467	3	u	377	523	1302	3878	5190	3
u	408	491	779	3753	5606	3	u	361	394	1100	3905	4267	3
u	440	486	979	3631	4997	3	u	356	398	1082	3732	5345	3
u	155	566	938	3786	4914	3	u	340	378	1039	3602	5368	3
u	429	662	1104	3814	5265	3	u	334	384	1026	3728	5103	3

Tableau B.7 Valeurs acoustiques prises au début (d) et au milieu (m) des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locuteur LB_e)

V (d)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.	V (m)	F0	F1	F2	F3	F4	Cond.
i	227	619	2941	4104	5165	1	i	279	412	3075	4136	4999	1
i	270	486	2918	4022	5006	1	i	281	404	3082	4023	4934	1
i	286	435	2930	4101	5481	1	i	288	402	3148	4020	5233	1
i	335	447	3085	4124	5195	1	i	297	459	3019	4115	4541	1
i	310	414	3012	4139	4473	1	i	297	398	3049	3924	4303	1
i	305	538	2941	3998	4781	1	i	290	436	2998	3940	4804	1
i	277	542	2996	3877	4900	1	i	275	448	3060	3990	5040	1
i	249	502	3019	4048	4183	1	i	275	377	3111	3687	4539	1
i	317	588	3047	3955	4781	1	i	296	438	3015	4105	4914	1
i	307	585	3034	3819	4909	1	i	285	452	3130	3880	4509	1
i	309	400	2953	3924	4794	2	i	281	473	3079	3658	4818	2
i	284	471	2856	3749	4441	2	i	279	430	2872	3481	4651	2
i	274	452	2933	3959	5139	2	i	275	448	2868	4015	4688	2
i	296	430	2893	3665	4715	2	i	293	404	2940	3483	4693	2
i	284	469	3040	3680	5092	2	i	284	477	3103	3791	4787	2
i	322	429	2935	3928	4928	2	i	292	426	2928	3800	4975	2
i	305	461	3060	3882	4965	2	i	299	491	3037	3720	4699	2
i	293	423	2926	4084	4940	2	i	287	454	3024	3846	4065	2
i	271	538	2883	3781	4382	2	i	286	501	2992	3667	4851	2
i	273	523	2840	3755	4583	2	i	293	461	3100	3904	4957	2
i	292	475	3178	4122	5166	3	i	285	441	3136	3919	5168	3
i	310	571	2973	3994	5125	3	i	283	466	3122	4066	5250	3
i	340	395	3157	4105	5224	3	i	292	371	3284	3953	4338	3

i	304	438	2946	4126	5248	3	i	286	413	3102	4163	5268	3
i	315	445	3094	4156	5281	3	i	285	395	3105	4246	5218	3
i	284	449	3114	4030	5058	3	i	291	422	3177	3705	4112	3
i	312	506	3006	3943	4990	3	i	296	487	3010	3924	5014	3
i	306	530	3040	4150	5037	3	i	296	394	3249	4142	5336	3
i	318	407	3310	4196	5086	3	i	287	477	3171	4157	4287	3
i	282	572	2977	3881	4805	3	i	282	472	2963	3932	4930	3
y	305	484	2363	3137	4385	1	y	274	431	2551	3174	4562	1
y	462	512	2433	3307	4496	1	y	278	512	2501	3312	4491	1
y	251	563	2350	3302	4525	1	y	274	481	2495	3307	4661	1
y	516	519	2363	3579	3996	1	y	270	487	2235	3185	4571	1
y	250	557	2536	3393	4087	1	y	273	448	2623	3290	4600	1
y	283	568	2255	3270	4060	1	y	279	503	2692	3346	4607	1
y	280	462	1786	3073	4300	1	y	275	424	2516	3031	4460	1
y	319	572	2071	3267	4128	1	y	279	416	3014	3347	4530	1
y	304	522	2443	3188	4674	1	y	288	522	2478	3169	4498	1
y	517	549	2550	3657	4894	1	y	273	494	2912	3650	4469	1
y	517	536	2581	2979	4193	2	y	271	438	2773	3154	4323	2
y	159	524	2697	2890	4264	2	y	268	473	2774	3057	4358	2
y	523	526	2598	3198	4395	2	y	273	508	2701	3451	4383	2
y	260	464	1846	2824	3835	2	y	268	484	2629	3194	4496	2
y	235	507	2582	3064	3959	2	y	278	525	2478	3184	4583	2
y	522	537	2215	2805	3916	2	y	271	482	2774	3601	4710	2
y	519	535	2645	3106	4526	2	y	278	510	2762	3068	4618	2
y	434	466	2668	3167	3948	2	y	274	440	2773	3079	4480	2
y	546	555	2742	2939	3924	2	y	282	517	2836	3270	4430	2
y	460	554	1907	3008	4427	2	y	269	469	2780	3119	4534	2
y	303	452	2699	3242	4519	3	y	286	462	2756	3162	4426	3
y	266	600	2506	3109	4506	3	y	283	552	2535	3076	4404	3
y	307	392	2056	3059	4457	3	y	277	425	2739	3228	4450	3
y	515	529	2622	3227	3930	3	y	286	481	2633	3208	4603	3
y	290	545	2702	3130	4548	3	y	287	510	2668	3119	4617	3
y	166	541	2557	2999	4449	3	y	281	448	2841	3196	4647	3
y	292	411	2810	3227	4440	3	y	274	460	2663	3248	4513	3
y	288	455	2770	3381	4554	3	y	279	466	2788	3214	4458	3
y	529	542	2590	3036	4519	3	y	279	521	2751	3144	4455	3
y	510	589	2775	3444	4438	3	y	274	470	2791	3293	4484	3
u	275	699	1557	3724	4588	1	u	286	486	837	3443	4615	1
u	300	663	1683	3467	4668	1	u	287	537	708	3466	4653	1
u	290	478	1291	3319	4558	1	u	302	563	870	3587	4734	1

u	547	702	879	3636	4643	1	u	291	478	922	3610	4601	1
u	274	753	1075	3372	4466	1	u	286	492	966	3638	4647	1
u	369	486	1239	3269	4324	1	u	282	532	1189	3365	4503	1
u	502	770	1450	3499	4576	1	u	276	513	1407	3289	4376	1
u	503	640	1908	3326	4525	1	u	289	503	877	3343	4483	1
u	506	692	1228	3265	4528	1	u	288	531	824	3239	4541	1
u	520	692	1527	3493	4570	1	u	288	492	962	3447	4716	1
u	516	708	2107	4060	4571	2	u	283	541	1065	3409	4596	2
u	583	699	1270	3429	4350	2	u	288	551	1213	3369	4572	2
u	506	743	2211	3809	4543	2	u	277	523	1128	3426	4365	2
u	294	987	1361	3655	4441	2	u	282	539	1130	3582	4304	2
u	559	639	1462	3149	4371	2	u	281	543	1411	3193	4321	2
u	553	705	1323	3763	4521	2	u	276	532	1382	3373	4473	2
u	548	817	2237	3952	4619	2	u	275	528	1249	3508	4559	2
u	596	619	1316	3424	4349	2	u	279	536	1362	3354	4464	2
u	300	594	1214	3415	4824	2	u	282	534	1133	3515	4737	2
u	243	817	1671	3643	4742	2	u	286	550	1449	3492	4793	2
u	292	700	1712	3779	4609	3	u	271	370	951	3211	4763	3
u	523	864	916	3558	4728	3	u	279	511	1015	3568	4758	3
u	547	626	1264	3398	4558	3	u	272	471	1086	3384	4437	3
u	572	781	1461	3526	4969	3	u	318	539	1071	3504	4788	3
u	552	696	1285	3396	4720	3	u	301	549	1204	3522	4792	3
u	312	653	1118	3316	4628	3	u	307	522	1236	3385	4532	3
u	548	677	1439	3373	4737	3	u	153	460	1172	3446	4569	3
u	522	538	1129	3388	4616	3	u	318	501	1235	3451	4392	3
u	566	594	1220	3475	4698	3	u	160	571	1263	3383	4691	3
u	314	553	914	3531	4681	3	u	319	527	1223	3462	4459	3

Tableau B.8 Valeurs acoustiques prises au milieu des voyelles (V) pour les trois conditions (1 = n1, 2 = p, 3 = n2) (locutrice MC)

Voyelle (m)	F0	F1	F2	F3	F4	Condition
i	326	341	2465	2849	4585	1
i	326	345	2745	3239	4625	1
i	329	356	2604	3307	4590	1
i	337	363	2653	2740	4686	1
i	324	345	2603	3517	4717	1
i	326	352	2648	3381	4594	1
i	328	368	2645	3350	4612	1
i	327	355	2619	3340	4542	1
i	332	375	2635	3337	4587	1

i	321	343	2502	3176	4662	1
i	321	358	2442	2896	4241	2
i	322	365	2530	3187	4547	2
i	326	352	2442	3051	4243	2
i	321	351	2466	3108	4350	2
i	323	354	2466	3107	4410	2
i	325	361	2532	3141	4252	2
i	319	339	2483	3164	4474	2
i	329	359	2563	2872	4227	2
i	319	350	2444	3170	4483	2
i	330	386	2545	3257	4522	2
i	313	358	2540	2792	4711	3
i	322	339	2620	3083	4777	3
i	315	365	2756	2768	4720	3
i	319	343	2446	2799	4770	3
i	317	357	2627	2687	4749	3
i	321	350	2616	2803	4791	3
i	306	360	2682	3684	4717	3
i	317	350	2641	3185	4767	3
i	317	357	2758	2885	4718	3
i	318	341	2664	2778	4728	3
y	269	407	2206	2583	4129	1
y	269	451	2151	2662	4136	1
y	266	435	2195	2623	4086	1
y	268	399	2196	2662	4080	1
y	263	412	2214	2636	4004	1
y	263	392	2240	2658	4051	1
y	259	415	2283	2669	4256	1
y	260	436	2260	2594	4226	1
y	268	395	2134	2608	4199	1
y	266	405	2162	2635	4037	1
y	279	425	2227	2522	3993	2
y	276	428	2190	2424	4014	2
y	275	419	2176	2525	3932	2
y	275	439	2145	2418	4015	2
y	276	407	2182	2321	4044	2
y	277	425	2194	2433	3992	2
y	280	426	2227	2437	4068	2
y	278	413	2194	2364	4127	2
y	277	446	2099	2345	4218	2
y	276	436	2198	2247	4048	2
y	287	401	2283	2835	4285	3
y	286	402	2251	2700	4135	3
y	284	416	2247	2790	4313	3

y	279	382	2218	2756	4276	3
y	286	395	2286	2525	4124	3
y	286	393	2263	2823	4267	3
y	290	398	2280	2769	4157	3
y	283	415	2212	2820	4390	3
y	286	394	2270	2859	4485	3
y	286	409	2266	2719	4217	3
u	291	439	818	2485	4216	1
u	295	437	889	2842	4553	1
u	296	400	890	2869	4288	1
u	297	401	899	2806	4445	1
u	297	406	898	2934	4523	1
u	292	426	863	2874	4416	1
u	301	379	910	2805	4308	1
u	302	360	915	2758	4355	1
u	299	371	903	2535	4161	1
u	301	369	907	2578	4180	1
u	312	473	938	2693	4073	2
u	319	387	967	2707	4150	2
u	315	419	956	2613	4096	2
u	317	401	956	2707	4132	2
u	317	396	961	2700	4130	2
u	316	409	961	2757	4153	2
u	317	388	965	2742	4234	2
u	315	416	954	2770	4330	2
u	311	385	943	2702	4064	2
u	316	394	958	2692	4239	2
u	313	401	901	2662	4461	3
u	312	420	923	2731	4364	3
u	315	389	943	2721	4404	3
u	315	378	934	2819	4397	3
u	312	387	939	3048	4480	3
u	318	344	964	2702	4341	3
u	311	384	914	2644	4367	3
u	315	412	936	2758	4225	3
u	317	375	945	2818	4408	3
u	315	380	940	2715	4181	3

APPENDICE C

PARAMÈTRES ARTICULATOIRES

Tableau C.1 Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour le locuteur AC_a

V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.	V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.
a	nl	-70,93	125,18	2,60	1,15	u	n2	-55,62	132,46	2,51	1,76
a	nl	-72,10	125,90	3,18	0,98	u	n2	-54,57	130,63	1,86	1,78
a	nl	-69,23	126,15	3,02	0,98	u	n2	-55,88	129,38	2,08	1,49
a	nl	-68,94	127,56	2,58	1,39	u	n2	-55,61	129,84	2,43	2,25
a	nl	-67,87	127,75	2,43	1,58	u	n2	-56,68	129,73	2,61	1,31
a	nl	-65,45	131,08	2,56	1,55	u	n2	-56,78	127,65	2,02	1,44
a	nl	-64,68	130,66	2,51	1,41	u	n2	-57,67	129,25	2,37	1,65
a	nl	-63,97	130,07	2,23	1,29	u	n2	-56,64	133,70	1,95	1,48
a	nl	-67,28	127,14	2,63	1,18	u	n2	-55,71	129,39	1,96	1,63
a	nl	-65,25	130,99	2,70	1,55	u	n2	-56,66	131,75	2,14	1,21
i	nl	-57,34	123,51	2,44	2,11	u	p	-56,30	124,82	1,59	0,79
i	nl	-58,32	126,72	2,58	2,26	u	p	-57,13	127,91	1,87	1,13
i	nl	-58,35	126,38	2,45	2,31	u	p	-55,29	124,86	1,69	0,81
i	nl	-57,98	126,34	2,30	2,39	u	p	-57,24	127,55	1,99	0,88
i	nl	-57,53	126,84	2,31	2,67	u	p	-55,42	129,98	1,90	1,13
i	nl	-58,74	123,12	2,31	2,07	u	p	-56,02	132,49	2,11	1,17
i	nl	-57,90	126,48	2,38	2,54	u	p	-57,86	127,81	1,92	0,81
i	nl	-58,49	129,63	2,51	2,44	u	p	-56,86	130,33	2,11	1,11
i	nl	-56,63	119,51	2,23	2,32	u	p	-58,63	127,66	2,05	0,87
i	nl	-56,99	125,93	2,34	2,43	u	p	-58,27	127,89	2,04	0,88
i	n2	-58,36	126,50	2,92	2,60	y	nl	-60,52	132,26	2,59	2,29

i	n2	-57,67	126,41	2,80	2,65	y	n1	-56,64	127,26	2,53	2,37
i	n2	-59,19	120,50	2,71	1,52	y	n1	-56,65	135,24	2,71	2,52
i	n2	-63,96	125,65	2,73	2,03	y	n1	-58,56	127,19	3,79	1,70
i	n2	-59,22	127,46	3,55	2,51	y	n1	-53,16	130,22	3,80	2,61
i	n2	-57,78	126,69	2,85	2,50	y	n1	-55,44	128,96	2,43	1,27
i	n2	-61,75	123,40	2,98	1,96	y	n1	-53,76	125,11	3,06	1,91
i	n2	-58,22	123,40	3,08	2,40	y	n1	-55,07	133,19	3,91	1,82
i	n2	-60,78	127,30	2,22	1,63	y	n1	-53,78	124,09	3,49	1,28
i	n2	-60,92	128,98	2,63	2,21	y	n1	-54,41	129,03	3,65	2,27
i	p	-59,44	128,34	2,81	2,92	y	n2	-54,54	130,22	3,04	2,73
i	p	-57,36	128,21	2,36	2,70	y	n2	-57,50	131,12	3,59	2,30
i	p	-56,93	125,62	2,43	2,85	y	n2	-57,20	129,90	3,20	2,54
i	p	-58,38	131,11	2,61	2,00	y	n2	-56,81	130,28	3,57	2,31
i	p	-58,32	131,18	2,57	2,82	y	n2	-56,11	130,01	3,48	2,77
i	p	-56,71	128,33	2,46	2,94	y	n2	-57,19	129,88	3,06	2,58
i	p	-56,77	126,37	2,46	2,68	y	n2	-56,72	130,32	3,63	2,29
i	p	-56,98	128,20	2,52	2,66	y	n2	-58,16	130,10	3,38	2,29
i	p	-56,33	124,73	2,19	2,88	y	n2	-57,10	130,06	3,40	2,30
i	p	-57,27	127,13	2,36	2,30	y	n2	-57,07	127,36	2,80	2,89
u	n1	-56,43	133,27	2,26	2,71	y	p	-55,58	133,63	3,49	2,24
u	n1	-57,19	130,15	2,14	2,10	y	p	-56,99	133,58	3,67	2,56
u	n1	-57,37	132,31	2,57	1,54	y	p	-55,92	133,58	3,41	1,62
u	n1	-56,83	130,25	2,22	1,70	y	p	-55,96	133,57	3,17	1,15
u	n1	-55,77	129,40	2,24	2,97	y	p	-56,78	131,24	3,40	2,72
u	n1	-56,47	132,49	2,04	1,67	y	p	-56,77	130,85	2,81	2,74
u	n1	-56,44	129,29	2,02	2,05	y	p	-55,36	130,65	2,64	2,96
u	n1	-56,11	129,10	2,01	1,81	y	p	-56,20	128,02	2,58	2,33
u	n1	-54,37	128,97	1,82	2,49	y	p	-56,32	130,78	2,96	2,55
u	n1	-55,49	128,98	1,88	1,19	y	p	-55,77	128,12	2,85	2,26

Tableau C.2 Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice AL_a

V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.	V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.
a	n1	-71,36	106,52	2,88	0,83	u	n2	-64,36	109,44	1,77	1,20
a	n1	-71,85	105,37	3,02	0,81	u	n2	-65,79	110,49	1,72	1,07
a	n1	-73,15	105,27	3,18	0,77	u	n2	-65,85	107,21	1,87	0,90
a	n1	-71,77	105,78	2,79	0,77	u	n2	-65,58	109,51	1,71	1,14
a	n1	-70,51	108,68	2,92	0,85	u	n2	-65,46	107,21	1,71	1,00
a	n1	-72,34	102,07	2,81	0,6	u	n2	-66,35	108,97	1,67	1,14

a	nl	-71,19	108,80	2,81	0,9	u	n2	-67,28	106,74	1,65	1,02
a	nl	-71,03	105,62	2,72	0,75	u	n2	-66,14	103,85	1,79	0,92
a	nl	-70,82	109,06	2,52	0,95	u	n2	-66,13	104,47	1,85	0,61
a	nl	-71,01	106,31	2,56	0,76	u	n2	-65,94	106,14	1,79	0,91
i	nl	-63,80	124,87	1,83	1,84	u	p	-66,07	108,93	1,98	1,22
i	nl	-66,07	127,26	2,08	2,16	u	p	-67,23	105,88	1,89	0,74
i	nl	-65,71	126,06	2,24	2,10	u	p	-67,91	103,93	1,98	0,81
i	nl	-64,71	122,67	2,32	1,53	u	p	-68,18	108,26	1,91	0,83
i	nl	-65,30	124,62	2,32	1,66	u	p	-67,96	105,53	1,75	0,78
i	nl	-64,62	126,16	2,19	1,89	u	p	-66,88	105,79	1,70	0,81
i	nl	-66,06	125,98	2,22	1,64	u	p	-67,26	105,18	1,76	0,75
i	nl	-64,65	125,74	2,02	1,70	u	p	-66,46	102,33	1,66	0,57
i	nl	-64,35	126,65	2,25	2,11	u	p	-66,85	102,55	1,68	0,58
i	nl	-65,92	127,58	2,40	1,65	u	p	-67,60	102,41	1,78	0,58
i	n2	-64,97	126,43	2,22	2,52	y	nl	-66,27	124,91	3,02	3,13
i	n2	-64,10	128,73	2,34	2,09	y	nl	-65,92	113,61	2,87	2,16
i	n2	-64,50	124,33	2,37	1,93	y	nl	-67,70	122,14	3,22	2,34
i	n2	-66,32	124,76	2,23	2,13	y	nl	-66,81	121,47	3,29	3,01
i	n2	-65,94	124,68	2,38	1,79	y	nl	-67,42	122,25	3,67	2,51
i	n2	-64,98	122,76	2,16	1,61	y	nl	-65,71	120,07	3,28	2,19
i	n2	-65,95	123,69	2,27	1,20	y	nl	-66,27	121,24	3,38	2,60
i	n2	-64,99	124,20	2,50	1,95	y	nl	-66,48	120,04	3,26	2,51
i	n2	-66,07	124,06	2,32	1,63	y	nl	-66,25	123,95	3,77	2,66
i	n2	-63,67	124,35	2,26	2,18	y	nl	-65,86	125,66	4,22	2,77
i	p	-67,45	128,07	2,46	2,08	y	n2	-66,17	121,13	3,42	1,89
i	p	-66,16	127,99	2,46	1,76	y	n2	-66,14	120,82	3,39	2,68
i	p	-68,66	128,38	2,59	2,01	y	n2	-65,20	117,01	3,43	2,37
i	p	-67,62	128,09	2,40	1,74	y	n2	-66,77	119,81	3,37	2,09
i	p	-66,90	127,91	2,32	1,85	y	n2	-66,43	119,79	3,42	2,07
i	p	-66,53	128,22	2,39	2,19	y	n2	-66,78	124,90	3,01	2,38
i	p	-66,86	128,74	2,37	2,11	y	n2	-65,13	124,63	3,07	2,44
i	p	-65,39	125,27	2,34	1,86	y	n2	-66,32	121,46	3,32	2,26
i	p	-66,25	128,30	2,31	2,09	y	n2	-66,12	125,06	4,60	1,99
i	p	-65,91	128,50	2,33	2,03	y	n2	-66,11	125,06	4,65	1,99
u	nl	-66,10	108,51	1,66	1,16	y	p	-66,48	123,41	2,37	1,77
u	nl	-66,49	108,37	1,74	1,12	y	p	-67,61	123,41	2,30	1,88
u	nl	-65,35	107,37	1,68	0,79	y	p	-66,54	124,19	2,44	1,91
u	nl	-64,64	104,76	1,63	0,74	y	p	-66,55	121,35	2,39	2,29
u	nl	-66,65	108,44	2,00	1,01	y	p	-66,59	122,47	2,50	1,94
u	nl	-65,56	107,41	1,84	1,06	y	p	-66,26	121,95	2,18	1,89
u	nl	-64,18	104,61	1,66	0,82	y	p	-68,04	121,93	2,45	1,53
u	nl	-64,41	108,15	1,70	0,79	y	p	-68,37	123,13	2,49	1,59
u	nl	-63,26	107,11	1,78	0,64	y	p	-67,65	122,52	2,30	2,03
u	nl	-65,17	107,64	1,73	0,72	y	p	-67,65	122,96	2,43	1,79

Tableau C.3 Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice JR_a

V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.	V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.
a	n1	-98,73	151,01	3,96	0,98	u	n2	-84,38	140,57	1,77	0,84
a	n1	-100,15	152,10	4,11	1,01	u	n2	-85,49	139,05	1,93	0,74
a	n1	-99,45	155,82	4,13	1,19	u	n2	-86,01	140,37	2,04	0,92
a	n1	-98,12	155,83	4,10	1,19	u	n2	-85,38	140,63	1,96	0,91
a	n1	-98,57	155,69	4,12	1,18	u	n2	-84,93	140,53	1,98	0,90
a	n1	-98,54	155,65	3,94	1,17	u	n2	-85,43	140,56	2,09	0,81
a	n1	-96,37	156,01	3,90	1,03	u	n2	-84,10	140,24	1,98	0,89
a	n1	-97,48	151,97	3,69	1,01	u	n2	-84,10	140,24	1,98	0,89
a	n1	-98,12	155,98	4,08	1,18	u	n2	-84,55	140,48	1,91	0,92
a	n1	-96,79	156,10	3,72	1,04	u	n2	-86,40	140,70	1,97	0,81
i	n1	-91,56	179,38	2,81	1,95	u	p	-84,72	135,67	1,97	0,95
i	n1	-95,63	174,43	3,12	1,47	u	p	-84,56	139,61	2,00	1,21
i	n1	-94,79	181,27	3,08	1,70	u	p	-85,49	144,71	2,02	1,48
i	n1	-94,73	182,70	3,26	2,56	u	p	-85,55	138,51	1,95	0,99
i	n1	-95,01	186,29	3,06	2,10	u	p	-85,40	142,28	1,88	0,92
i	n1	-90,72	178,89	2,77	1,38	u	p	-83,33	142,89	2,40	1,15
i	n1	-92,78	183,51	2,93	1,91	u	p	-83,58	143,02	2,05	0,76
i	n1	-92,50	181,64	3,10	2,24	u	p	-83,81	140,63	1,85	1,20
i	n1	-90,92	180,80	3,15	1,32	u	p	-83,81	140,90	1,93	1,15
i	n1	-92,07	182,92	2,90	1,91	u	p	-82,87	140,54	1,85	1,10
i	n2	-89,92	174,31	2,47	1,46	y	n1	-95,37	185,60	2,99	1,23
i	n2	-90,88	173,74	2,62	1,42	y	n1	-97,02	177,56	3,02	0,97
i	n2	-88,53	173,84	2,41	1,86	y	n1	-96,61	176,63	2,87	1,28
i	n2	-89,46	173,88	2,49	1,79	y	n1	-94,92	179,72	2,81	1,59
i	n2	-90,43	173,65	2,53	1,46	y	n1	-97,47	180,88	3,07	0,88
i	n2	-90,34	173,97	2,37	1,85	y	n1	-96,02	176,43	3,28	1,78
i	n2	-91,34	173,52	2,59	1,79	y	n1	-98,70	185,71	3,30	1,83
i	n2	-91,34	173,50	2,46	1,80	y	n1	-97,89	174,04	3,17	1,38
i	n2	-88,90	177,56	2,45	1,86	y	n1	-99,97	189,65	3,49	1,30
i	n2	-90,95	173,52	2,58	1,76	y	n1	-95,80	176,47	2,96	1,33
i	p	-96,22	169,72	2,98	1,15	y	n2	-91,98	170,16	3,20	1,51
i	p	-94,47	172,36	2,93	1,43	y	n2	-91,20	166,86	2,87	1,23
i	p	-95,24	169,98	2,91	1,20	y	n2	-90,72	164,36	2,97	1,31
i	p	-94,80	169,91	3,10	1,16	y	n2	-91,21	169,84	3,06	1,33
i	p	-93,57	173,16	2,93	1,33	y	n2	-90,30	168,77	2,78	1,16
i	p	-92,68	172,74	2,86	1,16	y	n2	-91,59	166,06	2,87	1,10
i	p	-97,34	178,25	3,38	1,40	y	n2	-90,75	168,22	2,97	1,31
i	p	-97,31	178,14	3,26	1,47	y	n2	-93,72	168,46	3,27	1,36

i	p	-97,27	179,01	3,35	1,45	y	n2	-91,56	166,87	2,94	1,10
i	p	-96,02	175,69	3,21	1,53	y	n2	-93,63	173,49	3,18	1,52
u	n1	-84,39	150,45	1,62	0,97	y	p	-89,95	164,83	2,79	1,76
u	n1	-85,52	145,22	1,82	0,69	y	p	-90,72	167,52	3,05	2,17
u	n1	-85,12	146,71	1,81	0,93	y	p	-92,65	164,74	2,77	1,47
u	n1	-85,12	146,83	1,79	0,96	y	p	-91,56	168,43	3,49	1,83
u	n1	-84,80	145,23	1,79	0,74	y	p	-91,73	168,28	3,18	1,69
u	n1	-83,23	136,99	1,68	0,59	y	p	-90,94	167,58	2,69	1,78
u	n1	-84,84	142,58	1,44	0,69	y	p	-90,56	164,32	2,47	1,53
u	n1	-83,51	144,93	1,49	0,89	y	p	-89,63	166,97	2,83	1,96
u	n1	-86,07	144,83	1,63	0,74	y	p	-89,88	163,92	3,15	2,06
u	n1	-85,32	147,03	1,78	1,03	y	p	-89,30	167,88	2,80	2,08

Tableau C.4 Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice MB_a

V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.	V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.
a	n1	-76,57	110,46	2,87	0,74	u	n2	-61,76	116,42	1,68	1,35
a	n1	-76,56	110,42	2,98	0,67	u	n2	-60,98	111,32	1,53	1,14
a	n1	-76,25	107,55	2,99	0,62	u	n2	-62,09	111,46	1,60	1,06
a	n1	-76,25	107,59	3,06	0,62	u	n2	-61,85	114,42	1,55	1,22
a	n1	-76,54	110,34	3,04	0,70	u	n2	-62,81	111,76	1,64	1,13
a	n1	-77,44	104,58	3,05	0,49	u	n2	-62,05	110,29	1,61	1,03
a	n1	-76,74	104,82	3,10	0,52	u	n2	-63,15	114,45	1,67	1,08
a	n1	-78,85	110,15	3,42	0,75	u	n2	-64,82	115,99	1,70	0,87
a	n1	-78,46	110,63	3,46	0,76	u	n2	-63,18	112,04	1,63	0,87
a	n1	-78,08	110,29	3,13	0,73	u	n2	-63,56	111,89	1,78	1,06
i	n1	-67,98	126,00	2,47	1,50	u	p	-56,88	106,41	2,50	1,04
i	n1	-68,35	126,78	2,48	1,40	u	p	-57,32	106,14	2,22	0,94
i	n1	-69,29	129,61	2,63	1,56	u	p	-59,61	102,62	4,12	0,84
i	n1	-71,00	129,34	2,75	1,38	u	p	-59,53	103,83	2,73	0,84
i	n1	-66,53	129,21	2,37	1,17	u	p	-59,76	108,95	2,79	0,70
i	n1	-67,92	129,84	2,43	1,39	u	p	-59,08	102,60	2,59	0,89
i	n1	-68,55	130,78	2,33	1,33	u	p	-59,08	102,57	2,41	1,04
i	n1	-67,55	127,62	2,20	1,16	u	p	-61,87	103,46	2,46	0,89
i	n1	-65,41	128,79	2,21	0,98	u	p	-61,29	104,99	2,00	1,09
i	n1	-68,60	126,29	2,33	1,21	u	p	-59,98	109,35	1,56	0,66
i	n2	-68,27	125,50	2,50	1,33	y	n1	-69,02	132,02	2,33	2,01
i	n2	-67,85	126,78	2,56	1,38	y	n1	-69,74	132,16	2,51	1,65
i	n2	-68,56	129,74	2,60	1,24	y	n1	-70,68	132,10	2,67	1,42

i	n2	-69,18	132,22	2,54	1,59	y	n1	-72,72	132,15	2,99	1,70
i	n2	-65,83	130,07	2,40	1,12	y	n1	-71,56	128,86	2,85	1,53
i	n2	-67,28	129,93	2,38	1,23	y	n1	-68,80	125,74	2,43	1,04
i	n2	-67,54	133,29	2,40	1,58	y	n1	-69,42	129,49	2,52	1,21
i	n2	-66,15	127,10	2,15	0,92	y	n1	-69,36	132,12	2,61	1,45
i	n2	-64,07	125,90	2,19	0,92	y	n1	-67,29	128,52	2,46	1,29
i	n2	-67,48	125,72	2,11	1,07	y	n1	-66,94	128,19	2,40	1,07
i	p	-71,69	130,12	2,75	1,65	y	n2	-71,93	134,34	2,79	1,83
i	p	-69,94	130,12	2,65	1,66	y	n2	-70,48	128,92	2,70	1,38
i	p	-67,82	129,99	2,44	1,42	y	n2	-71,61	134,86	2,83	1,57
i	p	-68,79	127,04	2,51	1,38	y	n2	-71,70	131,83	2,87	1,80
i	p	-68,46	127,06	2,48	1,38	y	n2	-71,04	132,17	2,59	1,63
i	p	-68,08	127,00	2,46	1,38	y	n2	-74,67	134,37	3,28	1,73
i	p	-69,14	127,15	2,56	1,39	y	n2	-76,63	134,68	3,61	1,59
i	p	-69,86	127,21	2,63	1,39	y	n2	-73,37	131,49	3,05	1,72
i	p	-68,04	123,90	2,41	1,13	y	n2	-72,70	131,98	3,01	1,62
i	p	-67,31	127,30	2,45	1,42	y	n2	-76,06	131,53	3,43	1,66
u	n1	-61,15	111,46	1,62	1,17	y	p	-67,40	129,74	2,41	1,20
u	n1	-60,20	112,96	1,72	1,52	y	p	-67,65	127,08	2,46	1,05
u	n1	-64,32	114,64	1,55	1,43	y	p	-65,51	131,65	2,16	1,32
u	n1	-61,34	112,56	1,47	1,07	y	p	-67,71	127,07	2,32	0,98
u	n1	-58,38	107,63	1,44	2,36	y	p	-67,81	129,90	2,27	1,21
u	n1	-61,91	111,28	1,43	0,97	y	p	-65,81	126,94	2,13	1,06
u	n1	-61,08	110,54	1,47	1,26	y	p	-67,49	132,01	2,34	1,34
u	n1	-62,10	110,12	1,49	0,90	y	p	-67,45	127,21	2,30	1,06
u	n1	-64,40	115,10	1,59	1,25	y	p	-69,04	134,64	2,41	1,63

Tableau C.5 Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice BP_e

V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.	V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.
a	n1	-105,43	163,54	2,29	0,48	u	n2	-102,78	176,94	3,22	1,91
a	n1	-106,69	163,58	2,32	0,36	u	n2	-101,41	179,51	2,93	1,67
a	n1	-107,68	167,32	2,82	0,60	u	n2	-101,93	179,01	3,20	1,75
a	n1	-106,69	162,80	2,36	0,48	u	n2	-99,80	170,80	2,09	1,35
a	n1	-106,65	164,29	2,55	0,57	u	n2	-100,77	170,90	2,09	1,53
a	n1	-107,20	167,62	2,66	0,55	u	n2	-100,71	171,77	2,38	1,59
a	n1	-104,22	160,18	2,26	0,36	u	n2	-100,15	180,01	2,42	2,23
a	n1	-104,70	160,05	2,35	0,42	u	n2	-99,73	172,13	2,29	2,02
a	n1	-107,72	157,18	2,53	0,26	u	n2	-102,52	176,60	2,72	1,89
a	n1	-106,51	160,28	2,19	0,41	u	n2	-105,26	176,46	2,68	1,57

i	nl	-101,70	189,43	2,77	1,04	u	p	-89,81	171,68	1,81	1,73
i	nl	-101,68	191,20	2,91	1,33	u	p	-92,46	176,76	2,10	1,45
i	nl	-111,88	181,67	5,41	1,22	u	p	-94,22	172,84	1,95	1,61
i	nl	-105,51	183,76	2,90	0,82	u	p	-95,62	173,23	2,19	1,53
i	nl	-103,74	191,36	2,87	1,34	u	p	-94,54	176,60	2,13	1,54
i	nl	-101,23	191,16	2,54	3,22	u	p	-90,36	172,58	1,90	1,53
i	nl	-102,49	196,44	3,04	1,89	u	p	-91,75	172,82	2,19	1,79
i	nl	-102,45	189,98	2,91	2,08	u	p	-93,14	172,74	2,04	1,63
i	nl	-104,32	183,95	2,93	1,17	u	p	-90,79	172,53	1,96	1,40
i	n2	-106,56	196,33	7,79	2,72	u	p	-90,16	168,25	1,84	1,51
i	n2	-104,26	196,07	7,04	2,52	y	nl	-90,29	176,40	1,81	0,33
i	n2	-101,81	189,33	4,14	2,44	y	nl	-92,94	180,98	1,90	0,53
i	n2	-99,47	182,95	3,19	2,72	y	nl	-93,78	171,33	1,96	0,13
i	n2	-97,25	183,06	3,09	2,59	y	nl	-92,75	177,43	2,06	0,37
i	n2	-107,53	185,48	7,10	1,63	y	nl	-93,66	177,73	1,81	0,40
i	n2	-107,52	177,76	5,29	1,65	y	nl	-95,46	178,01	1,94	0,42
i	n2	-98,03	199,56	6,38	2,90	y	nl	-90,82	177,28	1,86	0,40
i	n2	-107,43	201,53	10,59	0,95	y	nl	-89,72	181,64	1,93	0,65
i	n2	-103,29	188,00	5,21	2,08	y	nl	-93,96	181,27	2,07	0,31
i	p	-94,80	182,14	2,62	1,79	y	nl	-95,34	184,71	2,07	0,54
i	p	-98,47	189,56	3,09	2,59	y	n2	-87,42	170,17	1,96	1,08
i	p	-97,86	182,38	2,78	1,87	y	n2	-92,10	173,89	2,71	1,25
i	p	-97,12	177,41	2,55	1,40	y	n2	-91,59	177,85	2,71	1,14
i	p	-97,99	188,83	3,04	2,29	y	n2	-91,26	169,49	2,40	0,86
i	p	-103,80	184,97	3,72	1,98	y	n2	-91,23	169,39	2,53	1,16
i	p	-105,52	185,42	3,73	2,22	y	n2	-95,69	173,72	2,87	1,23
i	p	-107,71	185,25	4,31	1,99	y	n2	-92,56	166,91	2,43	1,11
i	p	-102,77	181,43	3,35	1,61	y	n2	-90,68	166,41	2,35	1,08
i	p	-102,76	181,77	3,35	1,58	y	n2	-90,23	166,41	2,28	1,01
u	nl	-94,47	165,93	1,52	0,64	y	n2	-89,82	169,78	2,27	1,10
u	nl	-95,43	169,87	1,77	0,86	y	p	-88,55	193,59	3,09	2,45
u	nl	-93,79	164,65	1,56	0,68	y	p	-88,20	188,83	2,72	2,07
u	nl	-97,50	165,96	1,68	0,57	y	p	-90,37	185,18	3,24	1,70
u	nl	-96,28	168,62	1,70	0,78	y	p	-87,82	180,72	2,54	1,47
u	nl	-97,06	173,78	1,66	0,97	y	p	-86,95	189,80	2,40	1,75
u	nl	-97,99	165,45	1,91	0,53	y	p	-86,88	176,65	2,45	1,45
u	nl	-98,45	169,54	1,77	0,75	y	p	-91,91	173,14	2,37	1,00
u	nl	-98,84	173,32	1,83	1,00	y	p	-94,69	163,94	2,58	0,82
						y	p	-91,73	181,30	2,66	1,58
						y	p	-95,62	181,90	2,78	1,22

Tableau C.6 Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour le locuteur JC_e

V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.	V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.
a	nl	-81,31	144,49	1,98	0,32	u	n2	-85,48	158,46	2,50	0,94
a	nl	-85,06	160,98	1,63	0,66	u	n2	-79,44	157,30	4,47	0,84
a	nl	-90,94	159,56	2,18	0,51	u	n2	-80,65	134,37	2,76	0,83
a	nl	-91,81	155,59	2,61	0,46	u	n2	-86,16	139,74	2,72	1,25
a	nl	-88,21	162,73	2,37	0,67	u	n2	-89,16	138,96	2,96	0,92
a	nl	-93,54	164,12	3,02	0,60	u	n2	-80,26	144,29	2,73	0,85
a	nl	-96,80	164,35	3,08	0,58	u	n2	-85,00	145,48	2,35	0,91
a	nl	-89,55	159,60	2,58	0,66	u	n2	-87,74	146,49	2,64	1,29
a	nl	-89,74	164,38	2,51	0,84	u	n2	-83,52	142,94	3,72	1,03
i	nl	-80,84	169,12	1,55	0,71	u	n2	-86,66	145,96	2,94	0,95
i	nl	-83,99	170,27	1,67	0,76	u	p	-74,66	146,51	3,02	1,55
i	nl	-84,04	175,46	1,84	0,97	u	p	-73,31	147,32	3,44	0,99
i	nl	-83,58	175,24	1,84	0,74	u	p	-77,00	139,48	3,22	0,82
i	nl	-84,54	175,36	1,80	0,80	u	p	-78,97	152,71	2,21	0,95
i	nl	-79,99	174,73	1,62	1,04	u	p	-81,60	151,58	2,61	0,56
i	nl	-82,03	170,62	1,54	0,76	u	p	-83,33	150,27	2,67	1,31
i	nl	-82,88	171,04	1,60	0,99	u	p	-77,64	155,21	2,72	1,07
i	nl	-86,06	174,84	1,95	0,84	u	p	-73,56	156,05	2,13	0,91
i	n2	-79,68	178,60	2,49	2,31	u	p	-78,97	159,59	2,77	1,02
i	n2	-82,97	176,21	2,06	1,32	u	p	-72,69	157,12	2,81	0,97
i	n2	-83,10	166,48	2,19	1,13	y	nl	-80,06	160,89	2,26	1,42
i	n2	-87,30	169,96	2,53	1,27	y	nl	-82,51	170,06	2,06	1,49
i	n2	-88,61	169,96	2,45	1,13	y	nl	-84,51	176,46	2,02	1,65
i	n2	-86,49	165,10	2,23	1,10	y	nl	-85,78	174,60	2,07	1,19
i	n2	-86,59	173,18	2,02	1,77	y	nl	-85,23	171,36	1,91	0,99
i	n2	-86,93	172,34	2,10	1,49	y	nl	-84,35	166,87	1,87	1
i	n2	-86,01	172,52	2,09	1,51	y	nl	-85,22	174,07	1,96	0,85
i	n2	-85,35	166,86	2,01	1,23	y	nl	-85,00	179,04	2,03	0,95
i	p	-81,10	177,98	3,12	1,28	y	nl	-85,88	172,95	1,89	0,59
i	p	-72,94	186,89	5,45	2,50	y	nl	-85,07	176,95	2,01	0,88
i	p	-74,25	185,32	2,20	3,48	y	n2	-80,52	182,02	3,02	3,48
i	p	-78,50	179,40	1,99	1,78	y	n2	-86,82	183,28	2,95	2,03
i	p	-78,63	181,15	2,48	1,63	y	n2	-85,29	187,91	2,89	2,89
i	p	-75,27	181,96	3,55	3,34	y	n2	-86,61	184,87	3,10	2,67
i	p	-75,57	188,87	3,64	3,22	y	n2	-87,55	184,92	2,88	2,8
i	p	-77,83	176,27	3,62	1,98	y	n2	-83,46	183,68	2,69	2,3
i	p	-74,51	181,25	3,00	2,44	y	n2	-89,42	183,15	3,25	2,17
i	p	-75,82	169,00	2,34	1,65	y	n2	-86,06	179,25	2,88	1,95

u	n1	-80,74	151,39	1,42	0,92	y	n2	-86,52	179,35	2,71	2,04
u	n1	-88,92	138,47	1,60	1,29	y	n2	-86,04	179,75	2,63	2,07
u	n1	-87,33	146,38	1,69	0,47	y	p	-77,89	174,36	2,32	3,06
u	n1	-85,78	147,00	1,58	0,84	y	p	-82,00	169,17	2,76	1,49
u	n1	-85,56	145,60	1,39	0,23	y	p	-81,42	169,71	2,52	1,68
u	n1	-83,87	150,79	1,59	0,37	y	p	-83,44	170,38	2,63	1,72
u	n1	-86,82	150,79	1,32	0,32	y	p	-89,13	170,90	2,93	1,37
u	n1	-78,50	159,57	1,33	0,94	y	p	-94,50	160,27	3,00	1,09
u	n1	-82,84	154,91	1,47	0,73	y	p	-96,34	159,40	2,93	0,81
u	n1	-85,56	148,65	1,50	0,35	y	p	-95,46	163,96	3,00	1,05
						y	p	-90,73	167,12	2,75	1,36
						y	p	-85,58	167,10	2,79	1,58

Tableau C.7 Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour le locuteur LB_e

V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.	V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.
a	n1	-97,02	162,66	2,90	0,32	u	n2	-85,94	156,56	2,98	1,18
a	n1	-96,69	163,97	3,09	0,66	u	n2	-89,37	172,95	3,35	1,70
a	n1	-91,56	166,41	2,48	0,51	u	n2	-90,07	171,56	3,39	1,59
a	n1	-91,92	163,38	2,61	0,46	u	n2	-89,62	170,36	3,99	2,01
a	n1	-92,81	163,99	2,47	0,67	u	n2	-88,14	155,34	3,34	1,22
a	n1	-92,34	163,54	2,51	0,60	u	n2	-83,70	148,29	3,11	1,70
a	n1	-94,05	158,73	3,22	0,58	u	n2	-79,29	144,68	2,52	1,56
a	n1	-90,34	150,72	3,59	0,66	u	n2	-81,96	157,89	2,53	1,18
a	n1	-90,07	158,77	3,23	0,84	u	n2	-84,52	150,40	2,88	1,22
a	n1	-92,26	159,28	3,33	0,40	u	n2	-91,56	170,22	3,59	1,97
i	n1	-82,68	181,19	1,55	1,30	u	p	-84,80	166,16	2,57	1,42
i	n1	-82,67	180,80	1,67	1,54	u	p	-79,76	173,81	2,72	1,98
i	n1	-84,06	180,70	1,84	1,53	u	p	-85,84	161,63	2,35	1,30
i	n1	-85,40	180,19	1,84	1,12	u	p	-89,10	171,40	2,80	1,30
i	n1	-83,29	175,37	1,80	1,01	u	p	-89,03	172,06	3,00	2,05
i	n1	-82,74	170,81	1,62	0,94	u	p	-83,91	166,68	2,91	1,59
i	n1	-84,65	172,59	1,54	0,88	u	p	-82,35	160,32	2,66	1,32
i	n1	-81,86	176,50	1,60	1,14	u	p	-84,49	161,58	2,72	1,81
i	n1	-82,74	180,41	1,95	1,39	u	p	-87,27	160,27	3,49	1,51
i	n1	-82,15	174,47	1,79	0,91	u	p	-84,97	160,83	3,19	1,58
i	n2	-82,55	162,51	3,69	1,76	y	n1	-85,14	170,74	2,49	1,92
i	n2	-85,40	161,77	3,47	1,22	y	n1	-84,19	167,15	2,24	1,45
i	n2	-80,15	169,20	3,66	3,35	y	n1	-84,22	168,19	2,24	1,50
i	n2	-81,67	158,41	3,81	2,07	y	n1	-84,07	167,58	2,44	1,65

i	n2	-81,05	162,19	3,67	2,00	y	n1	-84,07	168,41	2,14	1,75
i	n2	-79,92	173,36	3,28	3,64	y	n1	-84,56	167,91	2,24	1,62
i	n2	-78,50	166,54	2,94	2,55	y	n1	-86,35	160,74	2,41	1,23
i	n2	-83,58	170,10	3,05	1,82	y	n1	-86,58	158,82	2,22	1,25
i	n2	-80,92	177,12	2,96	2,85	y	n1	-90,75	154,78	2,72	0,90
i	n2	-81,12	165,31	3,48	2,36	y	n1	-84,10	163,37	2,55	1,26
i	p	-74,83	159,56	4,23	2,70	y	n2	-81,61	161,73	3,07	2,58
i	p	-77,93	169,91	3,19	2,71	y	n2	-83,46	161,54	3,56	2,44
i	p	-76,72	167,42	3,31	3,88	y	n2	-81,58	158,02	3,17	2,15
i	p	-80,10	163,26	3,16	2,28	y	n2	-86,42	153,24	3,83	1,36
i	p	-77,83	170,58	3,92	3,40	y	n2	-82,23	157,66	3,29	2,06
i	p	-75,48	170,42	5,52	4,62	y	n2	-85,03	152,63	2,84	1,43
i	p	-75,06	170,61	4,75	4,11	y	n2	-82,60	161,80	3,48	1,97
i	p	-79,93	176,37	3,43	3,92	y	n2	-83,70	158,12	3,31	1,67
i	p	-78,31	178,05	3,84	3,53	y	n2	-88,94	154,60	3,55	1,28
i	p	-77,44	168,01	3,64	2,82	y	n2	-80,36	157,38	2,82	2,01
u	n1	-81,78	156,15	2,18	0,61	y	p	-80,31	152,50	3,29	1,64
u	n1	-86,11	169,69	2,26	0,97	y	p	-80,41	158,76	3,54	2,53
u	n1	-87,20	162,74	2,04	0,63	y	p	-81,10	150,23	3,43	2,12
u	n1	-84,29	166,16	1,81	0,80	y	p	-78,34	149,53	3,24	1,79
u	n1	-85,67	162,61	2,13	0,51	y	p	-82,33	158,57	3,73	1,97
u	n1	-83,52	170,55	2,11	1,80	y	p	-79,99	149,53	3,72	2,10
u	n1	-86,35	165,90	1,96	0,41	y	p	-82,80	153,46	2,87	2,02
u	n1	-88,36	166,88	2,04	0,64	y	p	-81,44	153,49	2,88	2,14
u	n1	-86,01	166,91	1,73	1,34	y	p	-83,12	153,07	2,72	1,50

Tableau C.8 Données obtenues à l'aide des paramètres articulatoires sélectionnés (coordonnées du point le plus élevé du contour, courbure, position de la courbure) pour la locutrice MC_e

V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.	V	Cond.	Y	X	Courb.	Pos. Courb.
a	n1	-98,54	156,76	3,33	0,96	u	n2	-88,53	144,29	2,43	0,70
a	n1	-97,01	148,46	3,40	0,73	u	n2	-87,42	149,95	1,61	0,53
a	n1	-94,78	156,59	3,32	1,01	u	n2	-88,07	150,17	1,70	0,60
a	n1	-96,56	152,72	3,37	0,86	u	n2	-87,81	158,56	1,77	0,97
a	n1	-98,34	157,04	3,47	0,98	u	n2	-88,61	144,49	1,67	0,61
a	n1	-97,02	156,92	3,21	0,98	u	n2	-88,34	147,68	1,71	0,68
a	n1	-95,17	152,81	3,00	0,87	u	n2	-88,40	145,67	1,75	0,72
a	n1	-100,21	153,08	3,63	0,83	u	n2	-89,07	147,93	1,83	0,92
a	n1	-97,16	156,73	3,31	0,96	u	n2	-90,78	139,56	2,20	0,53
a	n1	-98,96	156,88	3,42	0,96	u	n2	-88,68	153,43	1,97	0,92
i	n1	-86,22	171,20	2,35	1,45	u	p	-80,28	168,96	1,94	1,18

i	nl	-88,16	165,81	2,40	1,27	u	p	-78,45	161,50	1,89	1,42
i	nl	-88,08	162,92	2,56	1,03	u	p	-79,70	156,11	1,66	0,96
i	nl	-87,30	159,76	2,37	1,06	u	p	-79,10	159,79	1,86	1,66
i	nl	-88,01	159,47	2,53	0,84	u	p	-76,96	161,42	1,68	1,15
i	nl	-88,62	162,18	2,58	1,21	u	p	-80,65	155,79	1,59	0,98
i	nl	-86,85	156,15	2,95	1,24	u	p	-80,19	158,80	1,83	1,09
i	nl	-85,61	158,66	2,61	1,03	u	p	-79,64	154,78	1,76	0,90
i	nl	-87,52	155,69	2,69	0,96	u	p	-81,03	151,84	2,47	1,28
i	nl	-89,05	157,44	2,87	0,93	u	p	-82,00	153,24	2,35	1,03
i	n2	-85,58	155,81	2,79	0,96	y	nl	-86,64	175,60	1,68	1,07
i	n2	-87,08	155,86	2,77	0,77	y	nl	-90,47	163,35	1,60	1,21
i	n2	-88,06	155,88	2,78	0,79	y	nl	-92,04	166,75	1,49	0,88
i	n2	-87,81	156,44	2,43	0,81	y	nl	-85,39	169,48	1,35	0,82
i	n2	-88,36	156,10	2,69	0,63	y	nl	-87,81	164,51	1,46	0,65
i	n2	-89,03	164,16	2,90	1,10	y	nl	-89,08	160,16	1,60	1,10
i	n2	-87,58	157,62	2,78	0,92	y	nl	-88,76	163,03	1,47	0,53
i	n2	-86,32	157,64	2,90	0,87	y	nl	-88,52	160,89	1,90	0,96
i	n2	-88,39	157,86	2,99	1,01	y	nl	-86,98	162,79	1,63	1,04
i	n2	-86,64	154,75	2,87	0,75	y	nl	-87,23	160,60	2,06	0,79
i	p	-86,43	169,97	2,80	1,28	y	n2	-87,52	172,61	2,52	1,79
i	p	-86,39	170,07	2,59	1,20	y	n2	-89,46	172,04	2,80	1,86
i	p	-84,83	165,68	2,61	1,25	y	n2	-91,75	166,33	2,91	1,64
i	p	-85,26	162,18	2,69	0,98	y	n2	-88,34	169,77	2,45	1,52
i	p	-85,23	161,53	2,67	0,91	y	n2	-89,26	164,76	2,70	1,20
i	p	-85,68	162,22	3,00	0,81	y	n2	-88,59	168,75	3,05	1,99
i	p	-85,90	156,99	2,84	0,78	y	n2	-89,43	166,35	2,80	1,75
i	p	-86,56	161,34	2,73	0,89	y	n2	-89,11	167,78	3,13	1,53
i	p	-85,69	161,21	2,81	0,90	y	n2	-90,07	176,24	3,33	1,76
i	p	-86,11	162,00	2,97	0,93	y	n2	-83,13	174,00	2,87	1,66
u	nl	-88,24	147,61	2,46	2,27	y	p	-76,41	192,04	1,84	3,07
u	nl	-87,50	154,92	2,99	1,38	y	p	-76,89	184,96	2,07	1,98
u	nl	-87,74	151,20	3,95	1,93	y	p	-77,60	179,80	1,98	1,93
u	nl	-86,27	151,21	2,55	1,58	y	p	-82,74	195,94	2,53	2,55
u	nl	-88,16	146,39	2,67	1,28	y	p	-84,56	189,72	2,16	2,02
u	nl	-86,75	151,79	2,80	1,37	y	p	-80,13	175,94	1,79	1,18
u	nl	-87,17	141,53	2,96	1,56	y	p	-79,73	181,80	1,81	1,54
u	nl	-87,04	152,46	3,02	1,64	y	p	-80,18	182,40	2,38	2,04
u	nl	-87,87	148,42	3,27	1,58	y	p	-80,71	173,29	2,00	1,19
u	nl	-87,81	148,04	3,03	1,48	y	p	-76,77	182,98	1,74	1,77

APPENDICE D

TRACÉS LINGUAUX

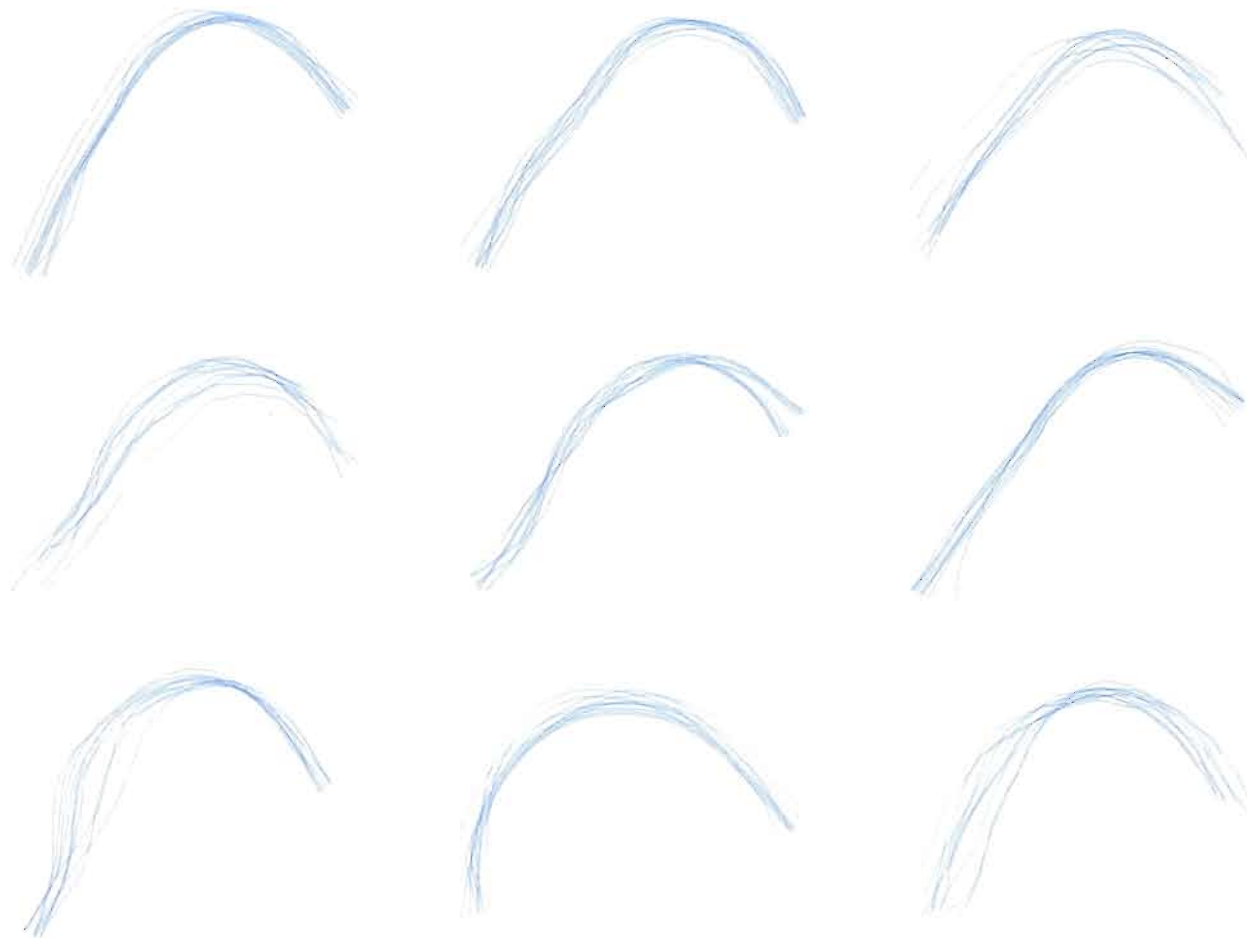


Figure D.1 Tracés des voyelles [i] (haut), [y] (centre) et [u] (bas) pour les conditions n1, p et n2 (Locuteur AC_a). Noter que pour tous les contours des locuteurs présentés à l'appendice D, l'apex de la langue se situe à droite.

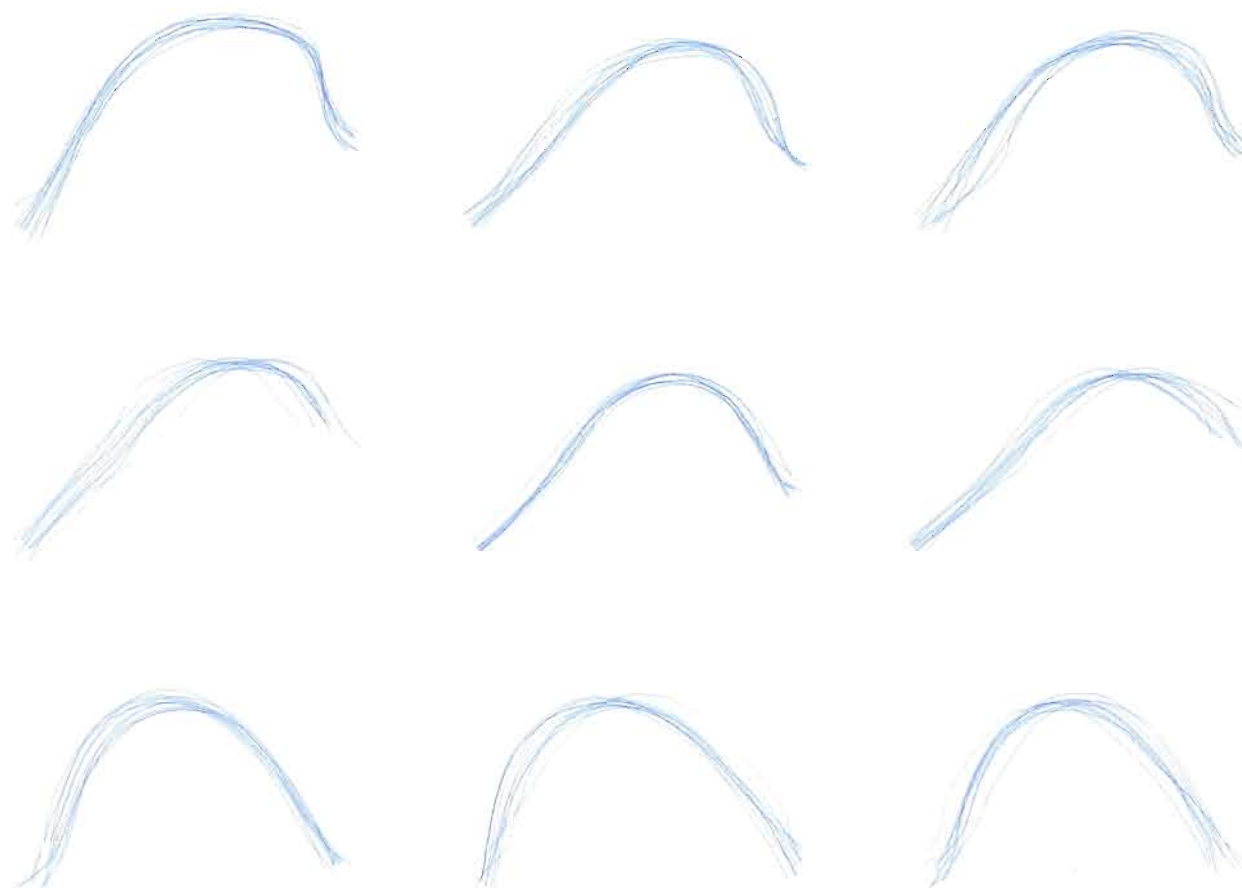
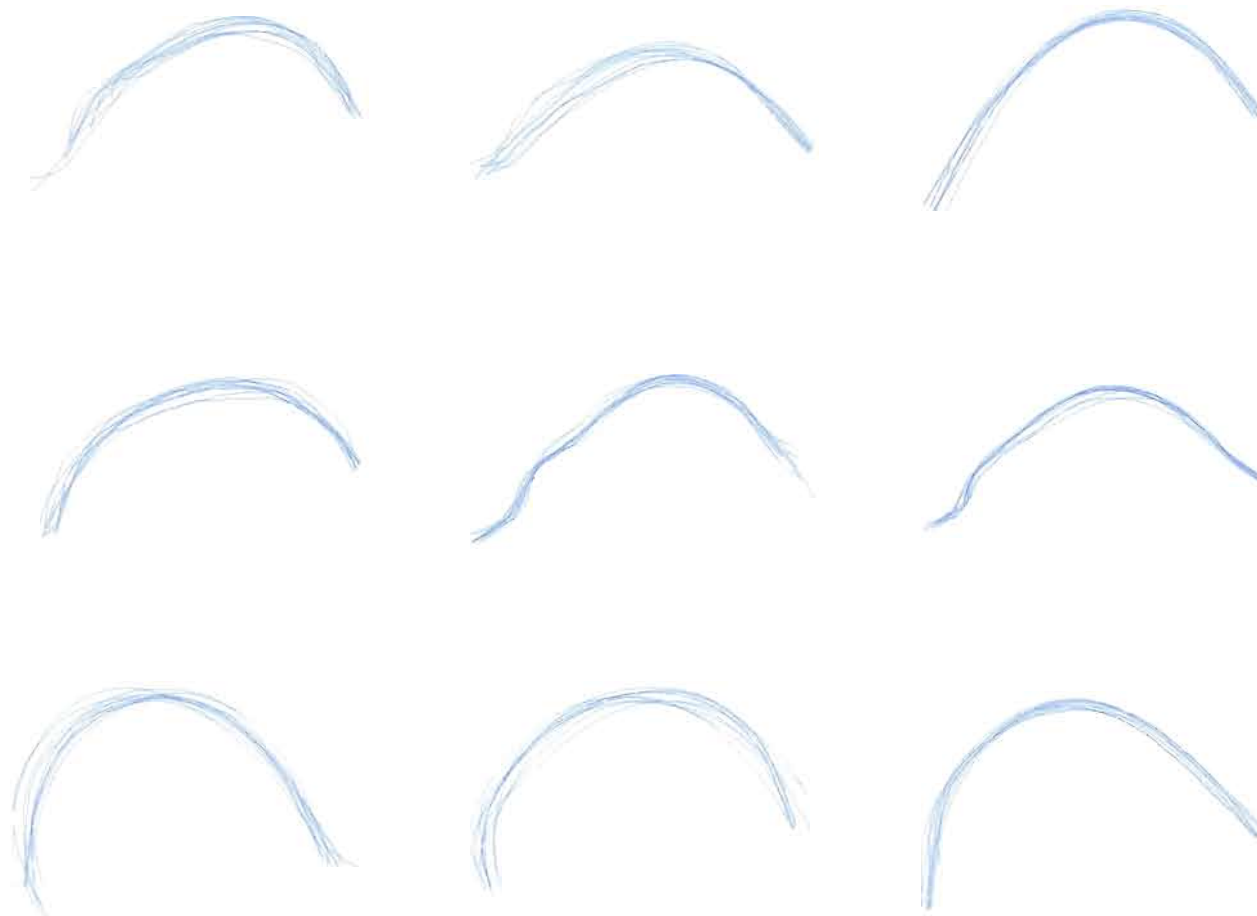
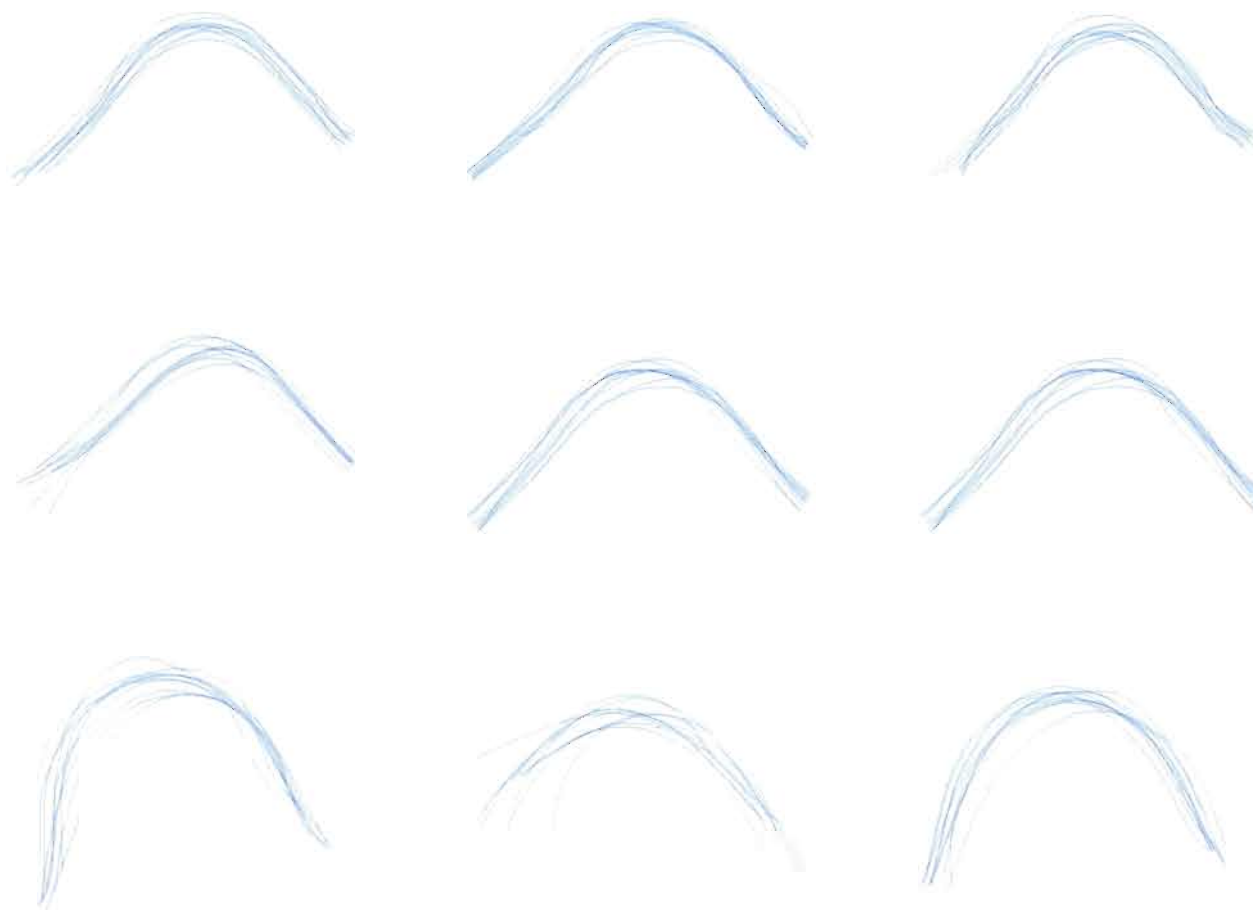


Figure D.2 Tracés des voyelles [i] (haut), [y] (centre) et [u] (bas) pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice AL_a). Noter que l'apex se situe à droite.



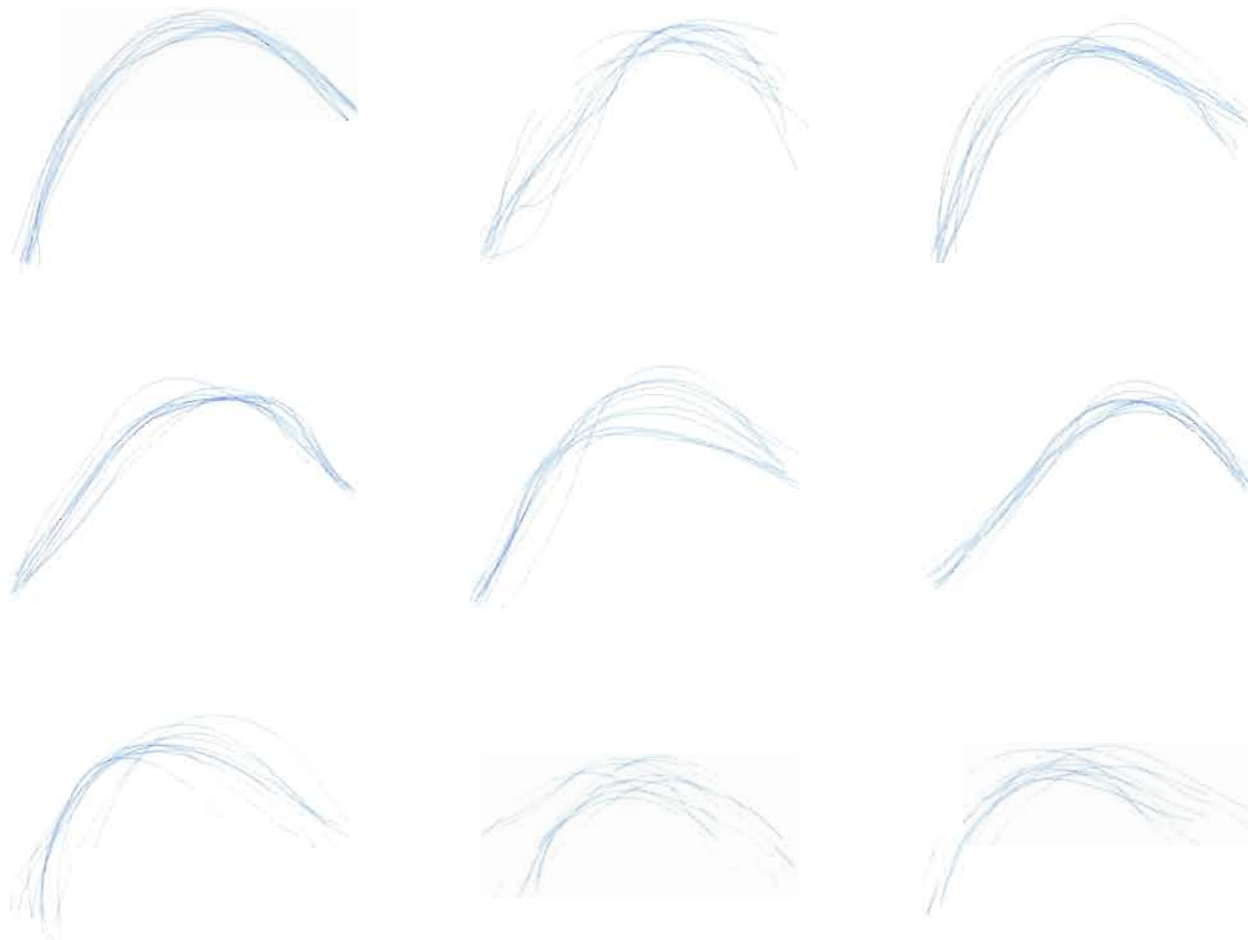
D.3 Tracés des voyelles [i] (haut), [y] (centre) et [u] (bas) pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice JR_a).



D.4 Tracés des voyelles [i] (haut), [y] (centre) et [u] (bas) pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice MB_a).



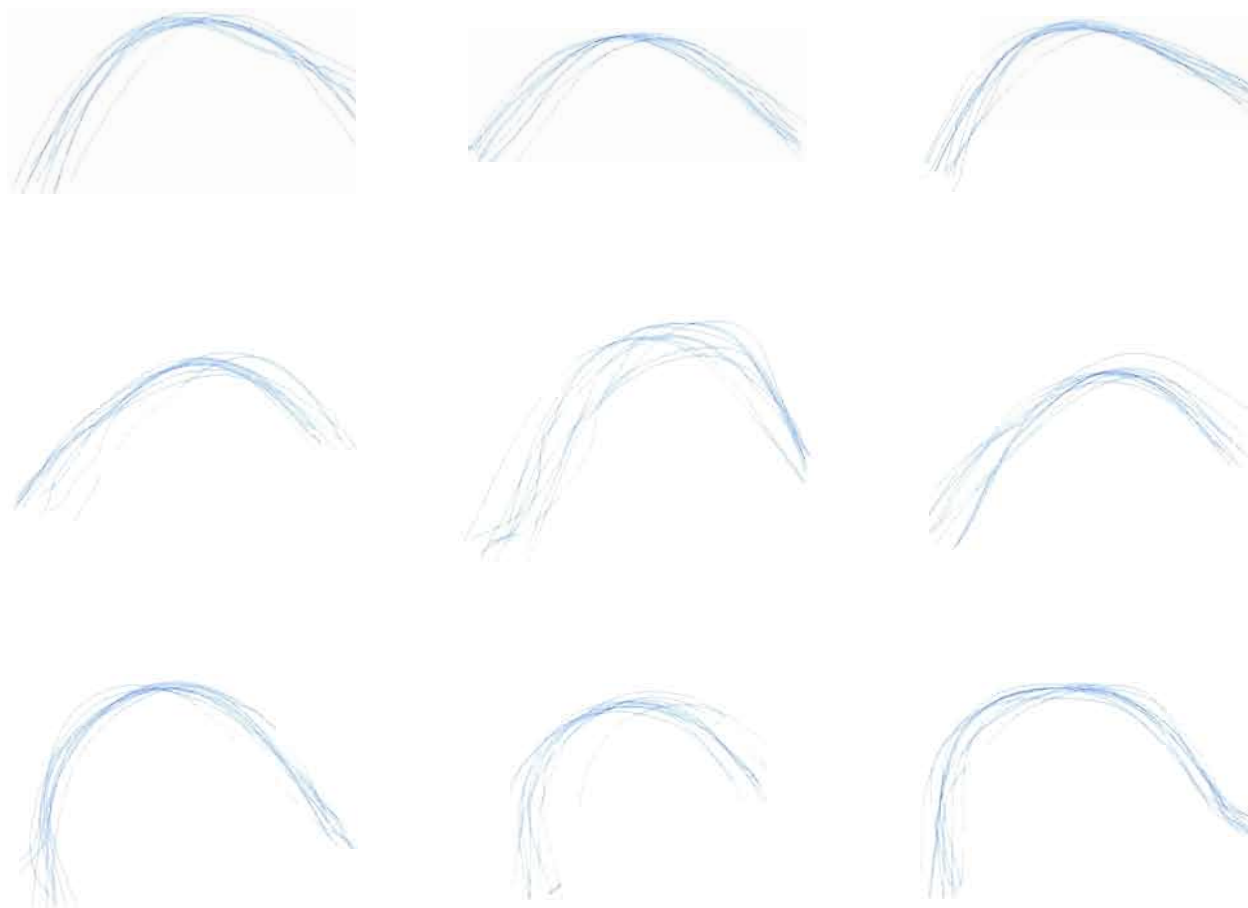
D.5 Tracés des voyelles [i] (haut), [y] (centre) et [u] (bas) pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice BP_e).



D.6 Tracés des voyelles [i] (haut), [y] (centre) et [u] (bas) pour les conditions n1, p et n2 (Locuteur JC_e).



D.7 Tracés des voyelles [i] (haut), [y] (centre) et [u] (bas) pour les conditions n1, p et n2 (Locuteur LB_e).



D.8 Tracés des voyelles [i] (haut), [y] (centre) et [u] (bas) pour les conditions n1, p et n2 (Locutrice MC_e).

BIBLIOGRAPHIE

- Abry, C. et P. Badin. 1996. «Speech Mapping as a framework for an integrated approach to the sensori-motor foundations of language». *1st ESCA Tutorial and Research Workshop on Speech Production Modeling-4th Speech Production Seminar*, Autrans, p. 175-184.
- Badin, P. et G. Fant. 1984. «Notes on vocal tract computation». *Speech Transmission Laboratory-Quarterly Progress Status Report*, vol. 2-3, p. 53-108.
- Badin, P., P. Perrier, L.-J. Boë et C. Abry. 1990. «Vocalic nomograms : Acoustic and articulatory considerations upon formant convergences». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 87, p. 1290-1300.
- Baum, S. R. et W. F. Katz. 1988. «Acoustic analysis of compensatory articulation in children». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 84, no 5, p. 1662-1668.
- Baum, S. R., D. H. McFarland et M. Diab. 1996. «Compensation to articulatory perturbation: Perceptual data». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, no 6. p. 3791-3794.
- Boë, L.-J., C. Abry, D. Beutemps, J.-L. Schwartz et R. Laboissière. 2000. «Les sosies vocaliques, inversion et focalisation», *23^e journées d'étude sur la parole*, Aussois, p. 257-260.
- Blumstein, S. E. 1986. «On acoustic invariance in speech». In *Invariance and variability in speech processes*, sous la dir. de Joseph S. Perkell et Denis H. Klatt, p. 179-201. Hillsdale (NJ): Lawrence Erlbaum.
- Borden, G. J. 1976. «The effect of mandibular nerve block upon the speech of four-year-old boys». *Language and Speech*, vol. 19, 173-178.
- Campbell, M. M. 1999. «Articulatory compensation for a bite block, with and without auditory feedback, in hearing and hearing impaired speakers». Thèse de doctorat, New-York, City University of New-York, 523 p.
- Cocusse, . 1996. « Stratégie de production et de compensation pour un robot-parlant : Le cas du [u] avec « lip-tube » ». Mémoire de DEA, Grenoble, Institut de la Communication Parlée.

- Edwards, J. 1992. «Compensatory speech motor abilities in normal and phonologically disordered children». *Journal of Phonetics*, vol. 20, p. 189-207.
- Fant, G. 1960. *Acoustic Theory of Speech Production*, Mouton, Le Hague, 328 p.
- Fant, G. 1966. «A note on vocal tract size factors and non-uniform F-pattern scalings». *KTH, Speech Transmission Laboratory-Quarterly Progress and Status Report*, vol. 4, p. 22-30.
- Fowler, C. A. 1991. «Auditory perception is not special: We see the world, we feel the world, we hear the world». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 89, no 6, p. 2910-2915.
- Fowler, C. A. 1996. «Listeners do hear sounds, not tongues». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, no 3, p. 1730-1741.
- Fowler, C. A. et Michael T. Turvey. 1980 «Immediate compensation in bite-block speech». *Phonetica*, vol. 37, p. 306-326.
- Gay, T., B. Lindblom et J. Lubker. 1981. «Production of bite-block vowels : Acoustic equivalence by selective compensation». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 69, no 3, p. 802-810.
- Gibson, A. et L. McPhearson 1980. «Production of bite-block vowels by children». *PERILUS Report*, vol. 2, p. 26-43.
- Gick, B. 2002. «The use of ultrasound for linguistic phonetic fieldwork». *Journal of the International Phonetic Association*, vol. 32, no 2, p. 113-121.
- Goldstein, U. G. 1980. «An articulatory model for the vocal tract of the growing children», Thèse de doctorat, MIT, Cambridge, Massachusett.
- Green, J.R., Christopher A. Moore et Reilly, K.J. 2002. «The sequential development of lip and jaw control for speech». *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, vol. 45, p. 66-79.
- Guenther, F. H. et J. S. Perkell. 2004. «A neural model of speech production and its application to studies of the role of auditory feedback in speech». In *Speech Motor Control in Normal and Disordered Speech*, sous la dir. de B. Maassen, R. Kent, H. Peters, P. Van Lieshout, et W. Hulstijn, p. 29-49. Oxford: Oxford University Press.
- Harshman, R., P. Ladefoged et L. Goldstein. 1977. «Factor analysis of tongue shapes». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, no 3, p. 693-707.

- Heinz, J. M. et K. N. Stevens. 1965. «On the relations between lateral cineradiographs, area functions, and acoustic spectra of speech». *Proceedings of the 5th International Congress of Acoustics*, A44.
- Honda, K. 1996. «Organization of tongue articulation for vowels». *Journal of Phonetics*, vol. 24, p. 39-52.
- Hoole, P. 1998. «Modelling tongue configuration in German vowel production». *Proceedings of the 5th International Conference of Spoken Language Processing*, vol. 5, p. 1863-1866.
- Hoole, P. 1999. «On the lingual organization of the German vowel system». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, no 2, 1020-1032.
- Hoole, P., A. Wismüller, G. Leinsinger, C. Kroos, A. Geumann et M. Inoue. 2000. «Analysis of tongue configuration in multi-speaker, multi-volume mri data». *Proceedings of the 5th Speech Production Seminar*, p. 157-160.
- Iskarous, K. 2005. «Patterns of tongue movement». *Journal of Phonetics*, vol. 33, p. 363-381.
- Jakobson, R. *Essais de Linguistique générale*, Paris, Éditions de Minuit, 214 pages.
- Jones, J. A et K. G. Munhall. 2003. «Learning to produce speech with an altered vocal tract: The role of auditory feedback». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 113, no 1, p. 532-543.
- Jordan, M., et D. Rumelhart. 1992. «Forward models : Supervised learning with a distal teacher». *Cognitive Science*, vol. 16, p. 307-354.
- Kelso, J. A. S. et B. Tuller. 1983. «Compensatory articulation under conditions of reduced afferent information : a dynamic formulation». *Journal of Speech and Hearing Research*, vol. 26, p. 217-224.
- Kent, R. D. 1992. «The Biology of Phonological Development». In *Phonological Development : models, research, implications*, sous la dir. de Ferguson, C. A., Menn, L. et Stoel-Gammon, C. p. 65-90. Timonium, MD, York Press.
- Lane, H., M. Denny, F. H. Guenther, M. Matthies, L. Ménard, J. S. Perkell, E. Stockmann, M. Tiede, J. Vick et M. Zandipour. 2005. «Effects of bite blocks and hearing status on vowel production». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 118, no 3, p. 1636-1646.
- Liberman, A. M. et I. G. Mattingly. 1985. «The motor theory of speech perception revised». *Cognition*, vol. 21, p. 1-36.

- Lindblom, B. 1971. «Acoustical consequences of Lip, tongue, jaw and larynx movement». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 50, no 4, p. 1166-1179.
- Lindblom, B. 1988. «Phonetic invariance and the adaptive nature of speech». In *Working Models of Human Perception*, sous la dir. de Ben A.G. Elsendoom & H. Bouma. p. 139-173. London, UK: Academic Press.
- Lindblom, B. 1996. «Role of articulation in speech perception: Clues from production». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, no 3, p. 1683-792.
- Linblom, B., J. Lubker et T. Gay. 1979. «Formant frequencies of some fixed vowels and a model of speech motor programming by predictive simulation». *Journal of Phonetics*, vol. 7, p. 147-161.
- Lindblom, B. et J. Sundberg. 1971. «Acoustical consequences of lip, tongue, jaw, and larynx movement». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 50, no 4, p. 1166-1179.
- Lindblom, B. et M. H. Sussman. 2002. «Principal components analysis of tongue shapes in symmetrical VCV utterances». Quartely Progress and Status Report (Department of Speech, Music and Hearing and Centre for Speech Technology, KTH, Stockholm), vol. 44, p. 1-4.
- MacNeilage, P.F. et B. L. Davis. 1990. « Acquisition of speech production : Frames then content ». In *Attention and Performance XIII : Motor Representation and Control*, sous la dir. de Jannerod, M., p. 453-475, Hillsdale (NJ), Lawrence Erlbaum,.
- McFarland, D. H. et S. R. Baum. 1995. «Incomplete compensation to articulatory perturbation». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, no 3, p. 1865-1873.
- McFarland, D. H., S. R. Baum et C. Chabot. 1996. «Speech compensation to structural modifications of the oral cavity». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100, no 2. p. 1093-1104.
- Maeda, S. 1990. «Compensatory articulation during speech : evidence from the analysis and synthesis of vocal-tract shapes using an articulatory model». In *Speech production and speech modelling*, sous la dir. de Hardcastle, W. J. et Marchal, A. p. 131-149. Dordrecht (The Netherlands), Kluwer Academic Publishers.
- Ménard, L. 2002. «Production et perception des voyelles au cours de la croissance du conduit vocal : variabilité, invariance et normalisation». Thèse de doctorat, Grenoble, Institut de la Communication Parlée.
- Ménard, L. 2003. «Acoustic variability and adaptive articulatory strategies during vocal tract growth revealed by the rounding contrast in French». *International Congress of Phonetic Sciences*, Août 2003.

- Ménard, L. et L.-J. Boë. 2004. «L'impact des facteurs anatomiques sur l'émergence du système vocalique chez l'enfant». *Revue Canadienne de Linguistique*, vol. 49, p. 155-174.
- Ménard, L., H. Loevenbruck et C. Savariaux. (à paraître). «Articulatory and acoustic correlates of contrastive focus in French: a developmental study». In *Towards a better understanding of speech production processes*, sous la dir. de Harrington, J. and Tabain, M. Psychology Press : New York.
- Ménard, L., P. Perrier et C. Savariaux. 2004. «Exploring production-perception relationships during speech development: a study of compensation strategies to a lip-tube perturbation », *147th Congress of the Acoustical Society of America*, vol. 115, no 5, p. 2629.
- Mielke, J., A. Baker, D. Archangeli et S. Racy. 2005. «Palatron: a technique for aligning ultrasound images of the tongue and palate». *Coyote Papers: Working Papers in Linguistics, Linguistic Theory at the University of Arizona*, vol. 14, p. 96-107.
- Netsell, R. 1985. «Construction and use of a bite-block for the evaluation and treatment of speech disorders». *Journal of Speech and Hearing Disorders*, vol. 50, p. 103-109.
- Nix, D. A., G. Papcun, J. Hogden et I. Zlokarnik. 1996. «Two cross-linguistic factors underlying tongue shapes for vowels». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, no 6, p. 3707-3717.
- Oller, D. K. et P. MacNeilage. 1983. «Development of speech production : Perspectives from natural and perturbed speech». In *The production of speech*, sous la dir. de Peter MacNeilage, p.91-108. New-York: Springer-Verlag.
- Perkell, J. S., F. H. Guenther, H. Lane, M. Matthies, P. Perrier, J. Vick, R. Wilhelms-Tricarico et M. Zandipour. 2000. «A theory of speech motor control and supporting data from speakers with normal hearing and with profound hearing loss». *Journal of Phonetics*, vol. 28, p. 233-272.
- Perkell, J. S., M. L. Matthies, M. A. Svirsky et M. I. Jordan. 1993. «Trading relations between tongue-body raising and lip rounding in production of the vowel /u/: A pilot "motor equivalence" study». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, no 5, 2948-2961.
- Perkell, J. S., M. Zandipour, M. Matthies, et H. Lane. 2002. « Economy of effort in different speaking conditions. I. A preliminary study of intersubject differences and modeling issues», *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, p. 1627-41.
- Perrier, P. 2005. «Control and representations in speech production». *ZAS Papers in Linguistics*, vol. 40, p. 109-132.

- Riordan, C. J. 1977. «Control of vocal-tract length in speech». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, no 4, p. 988-1002.
- Savariaux, C., P. Perrier et J.-P. Orliaguet. 1995. «Compensatory strategies for the perturbation of the rounded vowel [u] using a lip tube : A study of the control space in speech production». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 98, no 5, p. 2428-2442.
- Savariaux, C., P. Perrier, J.-P. Orliaguet et J.-L. Schwartz. 1999. «Compensation strategies for the perturbation of French [u] using a lip tube. II. Perceptual analysis». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, no 1, p. 381-393.
- Schroeder, M. R., B. S. Atal et J. L. Hall. 1979. «Objective measure of certain speech signal degradations based on masking properties of human auditory perception». In *Frontiers of Speech Communication Research*, sous la dir. de Lindblom, B. et Öhman, S. p. 217-229. London, Academic.
- Schwartz, J.-L., D. Beautemps, C. Abry et P. Escudier. 1993. « Inter-individual and cross-linguistic strategies for the production of the [i] vs. [y] contrast », *Journal of Phonetics*, vol. 21, p. 411-425.
- Schwartz, J.-L., L.-J. Boë, N. Vallée et C. Abry. 1997. « The Dispersion-Focalization Theory of vowel systems ». *Journal of phonetics*, vol. 25, p. 255-286.
- Smith, B. L. et A. McLean-Muse. 1987. «Effects of rate and bite-block manipulations on kinematic characteristics of children's speech». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 81, no 3, p. 747-754.
- Stevens, K. N. et S. E. Blumstein. 1981. «The search for invariant acoustic correlates of phonetic features». In *Perspectives on the study of speech*, sous la dir. de Peter D. Eimas et Joanne L. Miller, p. 1-38. Hillsdale (NJ): Lawrence Erlbaum.
- Stevens, K. N. 1989. «On the quantal nature of speech». *Journal of Phonetics*, vol. 17, p. 3-45.
- Stone, M. 2005. «A Guide to Analyzing Tongue Motion from Ultrasound Images». *Clinical Linguistics and Phonetics*, vol. 19, p. 455-502.
- Zheng, Y., M. Hasegawa-Johnson et S. Pizza. 2003. «PARAFAC Analysis of the Three dimensional tongue Shape». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 113, no 1, p. 478-486.